

Implementación de un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas por bruñido con rodillo simple

S. Díaz-Rojas, C. O. Boada-Carrazana, C. S. Padrón-Soroa

Recibido el 4 de octubre de 2008; aceptado el 14 de diciembre de 2008

Resumen

En el presente trabajo se exponen los fundamentos y los resultados de investigaciones realizadas sobre la operación secundaria de acabado superficial de piezas conocida como bruñido por rodillo simple.

Se realiza una investigación experimental en piezas simétrico-rotativas de acero AISI 1045 en un torno paralelo convencional con una herramienta de bruñir mono rodillo construida al efecto, donde se toman en consideración las variables más influyentes en el bruñido por rodillo simple: fuerza compresiva, avance y número de pasadas de la herramienta bruñidora. Se obtienen los modelos empírico-matemáticos que describen los efectos de estas variables en el incremento de la dureza y la calidad superficial final de la pieza, así como en la disminución del diámetro exterior y en la profundidad de la capa endurecida. Como resultado más importante de este trabajo, se desarrolla un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas mediante este tipo de tratamiento mecánico por deformación plástica superficial, que permitirá la creación y difusión de una disciplina tecnológica sobre un proceso de fabricación que posee ventajas y que está poco difundido en las empresas metalmecánicas.

Palabras claves: bruñido por rodillo simple, deformación plástica superficial, dureza superficial, rugosidad superficial, acero AISI 1045.

Implementation of a methodological procedure for parts elaboration by single roller burnishing.

Abstract

In the present work the foundations and the results of the investigation for the secondary operation of superficial finish (single roller burnishing) are presented. The most important aspects of the superficial plastic deformation process for improving superficial finish are approached

An experimental investigation in symmetrical-revolving pieces of steel AISI 1045 in a conventional parallel lathe with a burnishing tool of single roller built to the effect is carried out. The most influential variables were taken into consideration: compressive force, feed and number of passes of the burnishing tool. The empiric-mathematical models are obtained to describe the effects of these variables in the increment of the hardness and the superficial quality end of the piece, as well as in the decrease of the external diameter and in the depth of the hardened layer.

The most important result of this work is the proposal of a methodological procedure developed for the elaboration of parts by means of this type of mechanical treatment for superficial plastic deformation that will allow the creation and diffusion of a technological discipline about a manufacturing process that possesses advantages and that is little diffused in metalworking shops.

Key words: single roller burnishing, superficial plastic deformation, superficial hardness, superficial roughness, steel AISI 1045

1. Introducción.

El estudio de los procesos de conformado y del comportamiento de los diferentes tipos de materiales para las operaciones correspondientes está en pleno desarrollo en el mundo. Se necesitan más que antes, ingenieros e investigadores dedicados a este problema con una buena preparación teórica y práctica, ya que el grupo de materiales metálicos sigue representando una parte muy importante en el consumo mundial de materiales [1].

La deformación plástica superficial (DPS) constituye un método de tratamiento superficial de las piezas para incrementar sus cualidades físico-mecánicas, específicamente la dureza [1-3], el acabado superficial [1-6] y las tensiones residuales compresivas [4] aprovechando las características de plasticidad de los metales, lo que permite también incrementar la resistencia al desgaste [3], a la fatiga y a la corrosión.

Aunque el bruñido por rodillo se viene empleando desde inicios del pasado siglo en múltiples aplicaciones aún no se generaliza su empleo de manera sistemática, fundamentalmente por desconocimiento [7]. Asimismo se requiere del uso del herramental específico para su aplicación y de la correcta selección del régimen apropiado de trabajo, a partir del tipo de material tratado y del resultado deseado [8].

Existen diversos procedimientos para el empleo de la DPS como alternativa para el acabado de las piezas, siendo el bruñido por rodillo simple (BRS) un proceso muy empleado [1-4, 6,11]. El mismo resulta sencillo, de fácil aplicación y es posible emplearlo en una gran cantidad de tipos de piezas y de metales.

Los parámetros que más influyen en el proceso son la fuerza compresiva [1-3,5,6,11], el avance [1,3,6,11], el número de pasadas [1-4,6,11], la velocidad del bruñido [3-6,9], la profundidad de penetración [4,9], el tiempo de bruñido [9], la dureza superficial inicial [9], el acabado superficial inicial, el material de la pieza, la lubricación, entre otros.

Esta operación secundaria de acabado es menos nociva para el medio ambiente que los esquemas tecnológicos tradicionales. Esto resulta un motivo

más para que se estudie como alternativa tecnológica para el acabado superficial de las piezas por las ventajas que en el orden técnico, económico y ambiental les son inherentes a los procesos por DPS.

Este artículo estudia el empleo del BRS para mejorar las características superficiales, acabado y dureza, en probetas cilíndricas de acero AISI 1045 utilizando una herramienta instalada en un torno paralelo convencional. Para lograr las óptimas combinaciones de los parámetros de bruñido, así como para obtener las superficies de respuesta y los modelos matemáticos adecuados se empleó el software estadístico STATGRAPHICS. Fueron analizados los efectos de tres parámetros de bruñido, la fuerza, el avance y el número de pasadas en el incremento de la dureza y en el acabado superficial final de la pieza.

2. Propuesta del procedimiento metodológico para elaborar piezas mediante el bruñido por rodillo simple.

En muchas ocasiones este tipo de tratamiento mecánico es reportado en la literatura científica y técnica, y en las empresas metalmeccánicas no está todo lo difundido que debería estarlo, se realiza básicamente de manera empírica; por lo que se hace necesaria la creación y difusión de un procedimiento para lograr una disciplina tecnológica sobre este proceso de fabricación que posee las ventajas ya mencionadas.

Para lograr el establecimiento y la aplicabilidad de dicho procedimiento general, no solo basta con la elección del material y su valoración física, química y estructural; también se requiere tener en cuenta la teoría de la toma de decisiones y el flujo de información asociado a los cálculos ingenieriles y criterios tecnológicos en los procesos por DPS [1].

En la Figura 1 se muestra el esquema de la propuesta del procedimiento que establece la metodología para llevar a cabo esta operación secundaria de acabado por DPS. Del estudio previo realizado se desprende la necesidad de formular e introducir dicho procedimiento con vista a lograr resultados confiables que estén

avalados científicamente, ya que en la bibliografía revisada no se encontraron métodos de proceder declarados para abordar el estudio y la elaboración de piezas simétricas rotativas por este tipo de tratamiento mecánico.

Como todo tratamiento por deformación plástica en frío se parte de tres elementos primordiales: la herramienta, la máquina herramienta y el material a emplear. Se establecen, a partir de un estudio y caracterización de las experiencias y tendencias actuales, las acciones inmediatas a acometer.

Herramienta. Se consideran los dos tipos que se emplean en este bruñido (esfera y rodillo) y se selecciona la que posea las características que correspondan con el propósito y el tipo de pieza a tratar, teniendo en consideración el elemento deformante, las características constructivas, el principio de funcionamiento y la debida calibración.

Máquinas herramienta. Se consideran los tres tipos que se pueden utilizar en esta operación (convencionales, CNC y especiales) y que tienen sus características muy específicas, eligiendo el adecuado según el tipo de pieza a tratar, las prestaciones que ofrece y considerando su existencia en los talleres que se empleen.

Teniendo la definición y la argumentación para seleccionar los dos elementos antes abordados, se eligen los parámetros del régimen de elaboración por bruñido y se lleva a cabo el tratamiento mecánico.

La decisión de escoger el material obedece a las necesidades de operación de la pieza ya bruñida: si el material se requiere ferroso o no, el estado de entrega del mismo, la forma de la pieza a tratar, sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y tecnológicas y las características estructurales como los micro constituyentes y el tamaño de grano, entre los más importantes.

Una vez realizada la elección, se efectúa la caracterización del material y se fabrica la pieza, la cual debe cumplir un grupo de premisas tecnológicas. Entre las más importantes están un buen acabado superficial, un adecuado y exacto dimensionamiento y un espesor suficiente de la pieza.

Como parte de las comprobaciones a que es sometida la pieza se calcula y verifica la deflexión de la línea elástica y la relación de los respectivos diámetros de la pieza y del rodillo de la herramienta.

Paralelamente, antes de la realización de BRS, se realiza una medición previa de la dureza superficial, la rugosidad superficial y del diámetro exterior. Posterior al tratamiento se miden los parámetros anteriores. Con todos los datos obtenidos de los controles realizados antes y después del bruñido se lleva a cabo la investigación experimental, cuyo procesamiento estadístico se realiza con ayuda de un software estadístico profesional.

Los resultados son analizados y se obtienen adecuadamente los modelos empírico-matemático que describen el comportamiento de la dureza superficial y la rugosidad bajo el efecto de los parámetros del régimen de bruñido.

En este trabajo se aplica el método a través del experimento y se valida a partir de los resultados finales y de la obtención de modelos matemáticos.

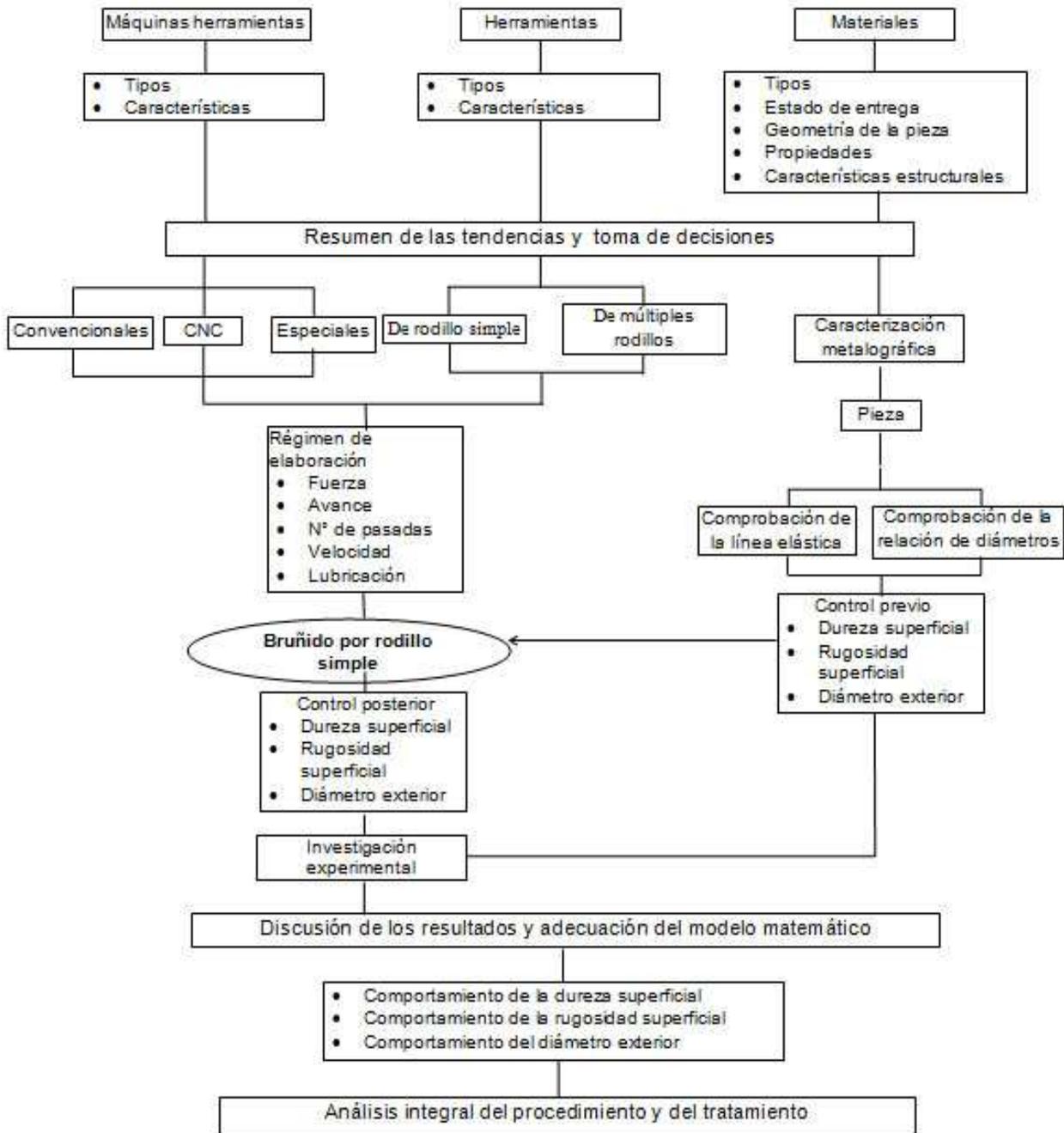


Figura 1. Procedimiento metodológico para la elaboración por bruñido con rodillo simple.

3. Trabajo experimental

Para la realización de los experimentos, la herramienta de bruñir fue instalada en un torno paralelo convencional modelo C-11 MT (Bulgaria). Fue especialmente diseñada una herramienta que se muestra en la Figura 2 y que se puede clasificar de rodillo simple montado entre apoyos con un

sistema de carga mecánico [1-3, 6, 11]. El rodillo tiene 41 mm de diámetro, 14 mm de ancho, es de acero AISI D2 con una dureza de 58 HRC y un acabado Ra de $0,8 \mu\text{m}$.

Como material de prueba se selecciona un acero AISI 1045 (0,48% C, 0,369% Si, 0,63% Mn, 0,027% P, 0,037% S) [1,10,11] porque es un acero al carbono [6] muy utilizado, dúctil, con buenas

propiedades mecánicas y representativo de la fabricación de piezas de la industria mecánica, específicamente de piezas tipo ejes. Se prepararon probetas a partir de una barra cilíndrica laminada en frío de 65 mm de diámetro. El diámetro exterior de la probeta es 63 mm y el ancho 16 mm.

El valor del diámetro de la probeta obedece al cumplimiento de la relación entre dicho diámetro y el diámetro del rodillo [8], (1). En (2) se muestra la relación obtenida para esta experimentación.

$$1,5 < \frac{D_p}{D_{rod}} < 2,5 \quad (1)$$

$$\frac{D_p}{D_{rod}} = \frac{63}{41} = 1,53 \quad (2)$$

Para garantizar el adecuado acabado superficial previo al bruñido por rodillo de la probeta, se maquinaron los cilindros con los siguientes datos de corte: avance de 0,09 mm/rev, profundidad de corte de 1 mm en una pasada, frecuencia de giro de 850 rpm y velocidad de corte de 173,57 m/min. Las mediciones de la dureza superficial se realizaron con un Durómetro Heckert, Mod. HMO 10 y las de la rugosidad superficial con un Rugosímetro *Hommelwerke*, Mod. T 1000, obteniéndose valores iniciales de dureza en un rango de 201 a 230 HV y de rugosidad (R_a) entre 0,49 y 1,14 μm . Las mediciones, antes y después del bruñido, se realizaron cuidadosamente según los procedimientos normalizados y aplicando los procesos estadísticos.

Las variables independientes consideradas en el modelo a experimentar y que constituirán los parámetros de trabajo del BRS son: fuerza compresiva, avance y número de pasadas de la herramienta.

Los parámetros seleccionados, tanto de entrada como de respuesta, permiten estudiar el comportamiento de algunas propiedades mecánicas y cualidades superficiales del material empleado al tratarlo superficialmente mediante BRS.

Otros parámetros considerados fueron la lubricación y la velocidad de bruñido.

El tratamiento se realizó en un ambiente debidamente lubricado, empleándose un aceite industrial soluble al 5% en agua y una frecuencia de giro constante de 150 rpm con una velocidad de trabajo de 29,68 m/min; estos se consideran valores bajos para evitar la posibilidad de existencia de falta de rigidez del sistema, ambas variables se fijan para lograr un modelo experimental con un número de corridas que no sea excesivo y que garantice confianza en los resultados.

Diseño experimental.

Se utilizó un diseño experimental del tipo factorial de múltiples niveles, Tabla 1, por sus características y facilidad de procesamiento, también por existir referencias de su empleo en experimentos que miden el comportamiento de materiales sometidos a este tipo de tratamiento superficial [1, 3, 9, 10, 11].

Para definir y establecer el rango y los niveles de las variables se realizó un experimento previo [11], donde se constató que el número de pasadas tiene una influencia poco significativa en los parámetros analizados de las piezas al variar entre 3 y 5 pasadas de la herramienta. Por esta razón solo se consideran dos niveles, lo que permite disminuir las corridas experimentales, ahorrar material, disminuir el tiempo en los ensayos y mantener un nivel satisfactorio de seguridad estadística en los resultados. Esto daría un modelo con un diseño factorial que resultaría en 18 experimentos. Cada uno de ellos se replicó 3 veces, para un total de 54 corridas experimentales

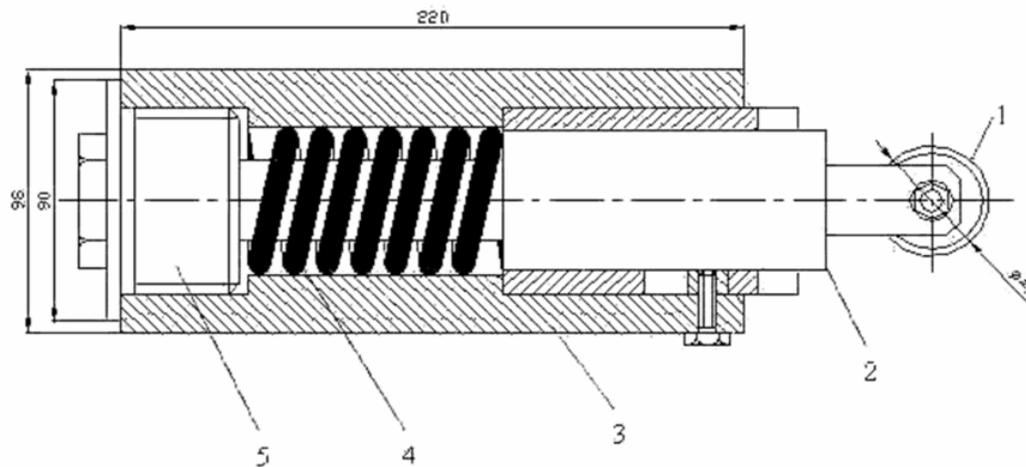


Figura 2. Esquema de ensamblaje de la herramienta de bruñido por rodillo simple: (1) rodillo, (2) vástago, (3) cilindro, (4) muelle, (5) calibre roscado.

Tabla No. 1. Parámetros de entrada del experimento

Parámetros	Niveles		
	Min.	Medio	Máx.
Fuerza (N)	1000	1500	2000
Avance (mm/rev)	0,066	0,147	0,228
Número de pasadas	3	-	5

4. Resultados y discusión

El procesamiento estadístico de los valores experimentales obtenidos se realizó con el paquete profesional *STATGRAPHICS® Plus Versión 4.1*. Se analizarán el comportamiento de la dureza superficial y el de la rugosidad superficial ante las variables de entrada propuestas, con sus respectivos modelos matemáticos que describen el efecto de las mismas.

Dureza superficial.

El modelo empírico matemático (3), que describe la influencia de las variables independientes consideradas, así como de las interacciones entre ellas, sobre el incremento de la dureza se ofrece a continuación:

$$dDureza = 60,38 - 0,06A - 220,43B + 0,24AB + 0,013AC + 255,07B^2 + 24,26BC + 0,00000001A^2C - 0,42AB^2 - 0,02ABC \quad (3)$$

Después del tratamiento se obtuvieron valores de dureza superficial en un rango de 217 a 251 HV. En la Figura 3 se muestra la superficie de respuesta estimada para el incremento de dureza al variar la fuerza y el avance con 3 pasadas de la herramienta. Los mayores incrementos de dureza se obtienen para la mayor magnitud de la fuerza aplicada (2000 N) y valores de avance entre 0,17-0,18 mm/rev. Curiosamente, se observa que los valores de los menores incrementos corresponden al mayor valor de la fuerza aplicada, para la menor magnitud del avance (0,06 mm/rev.).

La Tabla 2 contiene los valores óptimos de los parámetros de entrada ofrecidos por el software estadístico, estimados a partir del modelo estadístico-matemático obtenido, considerando

como criterio de maximización el incremento de la dureza.

Rugosidad superficial.

El modelo empírico matemático (4), que describe la influencia de las variables independientes consideradas, así como de las interacciones entre ellas, sobre el incremento de la calidad superficial, (disminución de la rugosidad superficial o mejoramiento del acabado superficial) después del tratamiento, es el siguiente:

$$dRugosidad = 60,50 + 0,06A - 1055,07B + 12,16C - 0,00002A^2 - 0,007AC + 4084,22B^2 - 1,94AB^2 + 0,04ABC \quad (4)$$

Al finalizar el tratamiento se lograron valores finales de rugosidad superficial (*Ra*) en un rango de 0,11 a 0,3 μm. En la Figura 4 se muestra la superficie de respuesta estimada. Las mejores calidades de la superficie se logran con magnitudes de fuerzas entre 1650 y 1750 N y valores de avance cercanos al límite inferior del intervalo analizado (0,066 mm/rev.).

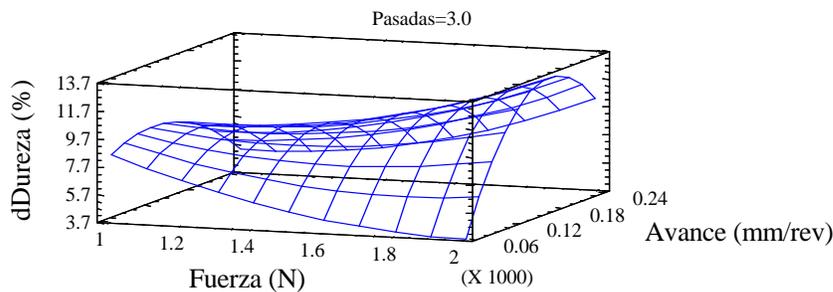


Figura 3. Superficie de respuesta estimada de la variación de dureza, para tres pasadas de la herramienta

Tabla No. 2. Valores óptimos de las variables considerando el criterio de aumento de dureza.

Optimize Response			

Goal: maximize dDureza			
Optimum value (%) = 13.092			
Factor	Low	High	Optimum
Fuerza (N)	1000.0	2000.0	1999.89
Avance (mm/rev)	0.066	0.228	0.176956
Pasadas	3.0	5.0	3.0

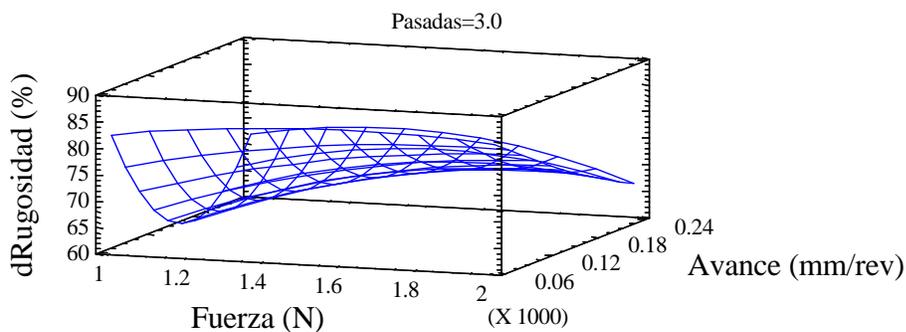


Figura 4. Superficie de respuesta estimada del mejoramiento de la calidad superficial, para 3 pasadas de la herramienta

La tabla No. 3 contiene los valores óptimos de los parámetros de entrada ofrecidos por el software estadístico, estimados a partir del modelo estadístico-matemático obtenido y considerando como criterio de maximización el mejoramiento de la calidad superficial.

El óptimo régimen de tratamiento propuesto en la Tabla 3 es el que ofrece los mejores resultados desde el punto de vista estadístico-matemático, no obstante, considerando que el efecto del número de pasadas es poco significativo y que su aumento no conlleva a un incremento representativo en el mejoramiento de la calidad superficial, y sí a inconvenientes desde el punto de vista económico, se decide repetir este análisis prefijando el número de pasadas de la herramienta en 3, tabla No. 4.

Con esta combinación de los parámetros del régimen de bruñido, se mejora la calidad de la superficie en un 84,28 % lo cual también es aceptable.

Análisis combinado del comportamiento de la dureza y la rugosidad superficial.

Después de analizados el comportamiento de la dureza y la rugosidad superficial se obtiene la figura 5 que muestra la superposición de los contornos de las superficies de respuestas estimadas en forma de isolíneas para la dureza superficial y para la rugosidad superficial, con el objetivo de establecer la zona donde se obtengan las combinaciones de avance y fuerza que ofrezcan los mayores incrementos de dureza y de calidad de la superficie para 3 pasadas de la herramienta.

Tabla No. 3. Valores óptimos de las variables considerando el criterio de mejoramiento del acabado superficial

Optimize Response			
Goal: maximize dRugosidad			
Optimum value (%) = 88.4769			
Factor	Low	High	Optimum
Fuerza (N)	1000.0	2000.0	1356.29
Avance (mm/rev)	0.066	0.228	0.066
Pasadas	3.0	5.0	4.99883

Tabla No. 4. Valores óptimos de las variables considerando el criterio de mejoramiento del acabado superficial para 3 pasadas de la herramienta.

Optimize Response			
Goal: maximize dRugosidad			
Optimum value (%) = 84.2845			
Factor	Low	High	Optimum
Fuerza (N)	1000.0	2000.0	1715.18
Avance (mm/rev)	0.066	0.228	0.066
Pasadas	3.0	3.0	3.0

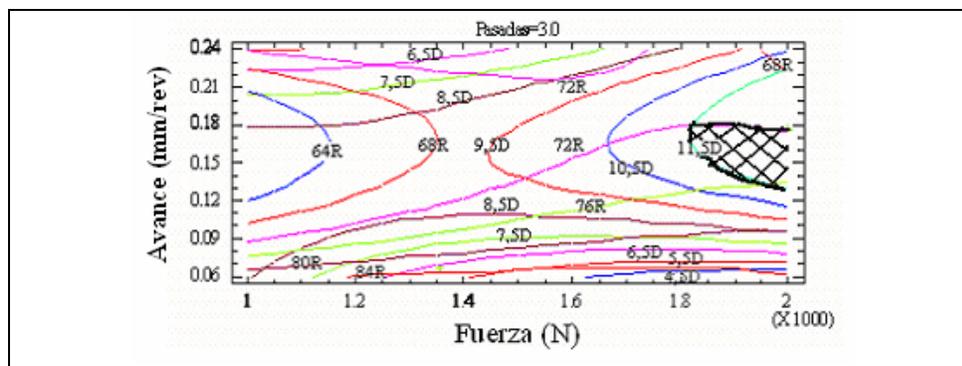


Figura 5. Superposición de los contornos de las superficies de respuestas estimadas de incremento de la dureza y la calidad superficial

En dicha figura se ha establecido una notación para simplificar la interpretación, por ejemplo, 11,5 D indica que la isolínea representa un incremento de 11,5% de dureza superficial, y 72R un incremento del 72% de calidad superficial.

Como se puede apreciar a la derecha de la figura se muestra la zona rayada donde se obtienen las combinaciones de avance (entre 0,13 y 0,18 mm/rev) y fuerza (entre 1800 y 2000 N) que ofrecen los mayores incrementos de dureza superficial (superiores a 11,5%) y de calidad superficial (entre 72% y poco más del 76%).

5. Conclusiones.

1. Los modelos empírico-matemáticos establecen la relación funcional entre el régimen de elaboración experimental y los resultados de la dureza y rugosidad superficial.
2. Se alcanzan incrementos de la dureza superficial entre 4,2 -9,7%. El mayor incremento de dureza se obtiene con una fuerza de 2000 N, un avance de 0,18 mm/rev y 3 pasadas de la herramienta.
3. Se alcanzan incrementos de la calidad superficial entre 58 - 89%. Considerando el aspecto económico se recomienda una fuerza de 1715 N, un avance de 0,06 mm/rev y 3 pasadas de la herramienta.
4. No se pudo establecer un modelo matemático ajustado que pueda describir el comportamiento de la disminución del diámetro exterior de la pieza tratada, por lo que se considera que el tratamiento aplicado no influye de manera significativa en ese parámetro.

6. Referencias.

1. **DÍAZ, S.** *Implementación de un procedimiento metodológico para elaborar piezas por bruñido con rodillo simple*. Tesis doctoral. Universidad Central de Las Villas, 2006.
2. **HASSAN, A. M.** The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non ferrous metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 72, nº p. 385-391.
3. **HAMADACHE, H.; LAOUAR, L., et al.** Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 180, nº p. 130-136.
4. **EL-KHABEERY, M. M. y EL-AXIR, M. H.** Experimental techniques for studying the effects of milling roller burnishing parameters on surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, nº p. 1705-1719.

5. **EBEID, S. J. y EL-TAWEE, T. A.** Surface improvement through hybridization of electrochemical turning and roller burnishing based on the Taguchi technique. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. *Journal of Engineering Manufacture*, 2005, vol. 219, nº p. 423-430.
6. **EL-AXIR, M. H.** An investigation into roller burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40, nº p. 1603-1617.
7. **OGBURN, F.** Roll to the finish. *Cutting Tool Engineering*, 2001, vol. 53, nº p. 54-57.
8. **ODINTSOV, L. G.** *Endurecimiento y acabado de piezas por deformación plástica superficial. Manual.* Moscú: Editorial Mashinostroenie, 1987.
9. **EL-AXIR, M. H. y EL-KHABEERY, M. M.** Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 132, nº p. 82-89.
10. **LEE, S. S. G.; TAM, S. C., et al.** An investigation into the ball burnishing of an AISI 1045 free form surface. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, vol. 29, nº p. 203-211.
11. **DÍAZ, S. y ROBERT, T.** Efecto del bruñido por rodillo simple en el acero AISI 1045. *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, 2005, vol. 2, nº p. 32-40.
12. **BOADA, O.; DÍAZ, S., et al.** Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial. *Ingeniería Mecánica*, 2003, vol. 6, nº p. 53-58.
13. **EL-AXIR, M. H. y IBRAHIM, A. A.** Some surface characteristics due to center rest roller burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 167, nº p. 47-53.
14. **HASEGAWA, S.** The road to smoother surfaces. *Manufacturing Engineering*, 2001, vol. 126, nº p. 70-78.
15. **PACANA, A. y KORZYNSKI, M.** Roller burnishing parameters analyses with Taguchi method. *Scientific Bulletins of Rzesow University of Technology*, 2002, vol. 193, nº p. 273-277.
16. **WESTERMAN, W. J.** Industry rediscovers roller burnishing. *Machine Design*, 1983, vol. 55, nº p. 44-48.

Nomenclatura.

Dp	Diámetro de la probeta (mm)
Drod	Diámetro del rodillo (mm)
HV	Dureza Vickers
Ra	Rugosidad superficial (μm)
dDureza	Incremento de la dureza superficial después del tratamiento (%)
dRugosidad	Incremento de la calidad superficial después del tratamiento (%)
A	Fuerza compresiva (N)
B	Avance de la herramienta (mm/rev.)
C	Número de pasadas de la herramienta

S. Díaz-Rojas, C. O. Boada-Carrazana, C. S. Padrón-Soroa

Departamento de Procesos Tecnológicos, Facultad de Ingeniería Mecánica.

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Carretera a Camajuaní Km 5½, Santa Clara, Villa Clara. C.P. 54830. Cuba

E-mail: silviodr@uclv.edu.cu , oboada@uclv.edu.cu , sergiops@uclv.edu.cu