

EFFECTOS SUPERFICIALES DEL BRUÑIDO POR RODILLO EN EL ACERO AISI 1045

Silvio Díaz^{1*}, Teresita Robert^{2*}, Ortelio Boada¹

1: Dpto. de Procesos Tecnológicos, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Las Villas. Santa Clara, Cuba.

2: Dpto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México.

* E-mail: silviodr@uclv.edu.cu, robertn@servidor.unam.mx

Recibido: 08-Jul-2008; Revisado: 14-May-2009; Aceptado: 22-May-2009

Publicado On-Line: 29-Jun-2009

Disponible en: www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html

Resumen

El bruñido por rodillo simple es un proceso de deformación plástica que mejora la calidad superficial y las propiedades mecánicas de los materiales. Se realizó un estudio experimental en piezas simétricas rotativas de acero AISI 1045 en un torno paralelo convencional, empleando una herramienta de bruñir por rodillo simple construida para tal efecto. Las variables empleadas en el proceso son las consideradas más importantes: fuerza compresiva, avance y número de pasadas de la herramienta. Los modelos estadísticos que describen el efecto de las variables del proceso en el incremento de la dureza superficial y la calidad superficial y en la variación del diámetro exterior fueron procesado por el software STATGRAPHICS® Plus v.4.1. Se muestra un gráfico que toma en consideración una combinación de los contornos en isóneas de las superficies de respuesta estimada de los incrementos de la dureza y de la calidad superficial, de donde de una manera fácil, se obtienen las combinaciones de fuerza compresiva y avance para obtener los resultados buscados.

Palabras Claves: Bruñido por rodillo simple, Deformación plástica superficial, Rugosidad superficial, Dureza superficial

Abstract

Single roller burnishing is a plastic deformation process which improves surface quality and some mechanical properties of materials. An experimental study in AISI 1045 steel axisymmetrical pieces is performed in a conventional parallel lathe with a burnishing roller tool fabricated for this experimentation. The process variables used, are those considered as the most important: compressive force, feed and number of passes of the burnishing tool. Statistical equations describing the effect of the process variables on hardness, surface quality and external diameter increments are processed by STATGRAPHICS® Plus v.4.1. From the estimated surface responses, shown in contour isolines of hardness and surface quality increments, a combined graph is produced, where the compressive force and feed combinations are easy to locate for obtaining the targeted burnishing results.

Keywords: Single roller burnishing, Surface plastic deformation, Surface roughness, Surface hardness

1. INTRODUCCIÓN

El acabado superficial de piezas metálicas es de vital importancia en el mundo actual, ya que los fenómenos físicos, químicos y mecánicos que afectan su desempeño generalmente se inician en la superficie. Se necesitan, más que antes, ingenieros e investigadores dedicados a estos temas con una buena preparación teórico-práctica, ya que los metales siguen 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 la plasticidad de los metales, lo que permite también incrementar la resistencia al desgaste [3], a la fatiga y a la corrosión [1].

Aunque el bruñido por rodillo se viene empleando desde inicios del pasado siglo en múltiples aplicaciones, aún no se utiliza 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 deformación plástica superficial como alternativa para el acabado de las piezas, siendo el bruñido por rodillo simple un proceso muy empleado que resulta sencillo, de fácil aplicación y es posible emplearlo en una gran cantidad de tipos de piezas y de metales [1-4,6,9,10].

Entre los parámetros que más influyen en el proceso se encuentran la fuerza compresiva [1-3,6,9], el avance [1,3,6], el número de pasadas [1-4,6], la velocidad del bruñido [3-6,9], la profundidad de penetración [4,11], el tiempo [11], la dureza superficial inicial [11], el material de la pieza [2,10,11], la lubricación [9], la combinación con otros tipos de tratamientos [5,10], el ancho de contacto del rodillo [9], la orientación del bruñido [9] y el acabado superficial inicial [2-4,10,12], entre otros. En estos trabajos se ha podido analizar el comportamiento de diferentes parámetros como la rugosidad superficial [1-6,9,10], la dureza superficial [1-3,9], la microdureza [1,4,6,10,11], la profundidad de la capa endurecida [1,10], la disminución del diámetro exterior [1,11], la resistencia al desgaste [3,9], las tensiones residuales [4,6] y las propiedades tribológicas [9].

Este tratamiento mecánico aumenta la resistencia al desgaste, porque al bruñirse la superficie casi se nivelan la altura de las crestas y la profundidad de los valles, reduciendo el desgaste de dicha superficie. La resistencia a la fatiga aumenta por la acritud y la aparición de altas tensiones residuales compresivas en la capa subsuperficial. El bruñido ayuda a disminuir las imperfecciones como son los poros, las hendiduras y las marcas o huellas dejadas por la herramienta durante la elaboración de la pieza a bruñir. También aumenta la resistencia a la corrosión, porque al reducir la porosidad y las marcas de herramientas, las sustancias reactivas o contaminantes tienen menor posibilidad de corroer a la superficie bruñida.

El bruñido es una operación secundaria de acabado superficial, menos nocivo para el medio ambiente que los esquemas tecnológicos tradicionales utilizados para endurecer y mejorar las superficies; lo cual resulta en un motivo más para que se estudie como alternativa tecnológica por las ventajas en el orden técnico, económico y ambiental.

Este artículo estudia el empleo del bruñido por rodillo simple para mejorar las características superficiales, acabado o rugosidad y dureza, en probetas cilíndricas de acero AISI 1045 utilizando

un torno paralelo convencional.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Material

Se selecciona para la experimentación un acero de contenido medio de carbono, AISI 1045, cuya composición química se muestra en la Tabla 1. Este acero ha sido empleado en experimentaciones similares [1,10,13,14], porque es representativo en la fabricación de piezas de la industria mecánica [6,10], específicamente de piezas tipo ejes y, además, es de fácil deformación.

Tabla 1. Composición química del material de la probeta.

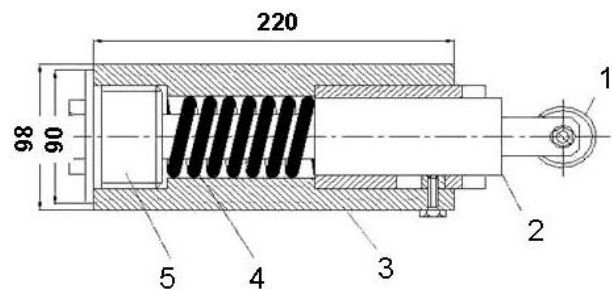
C	Mn	Si	P	S
0,48%	0,63%	0,369%	0,027%	0,037%

2.2 Herramienta de Bruñir

Para la experimentación se diseñó y fabricó una herramienta que se puede clasificar de rodillo simple, con un sistema de carga mecánico (Figura 1) [1-3,6,9,10].



(a)



(b)

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

En la Figura 1(b) se muestra el cilindro (3) que está firmemente instalado en el porta-herramienta del torno paralelo. El muelle helicoidal de compresión (4) (41 mm de diámetro, 14 mm de ancho, acero AISI D2, dureza 58 HRC y acabado Ra 0,8 μm) ejerce la fuerza durante el tratamiento, la cual se transmite a través del vástago (2) al rodillo (1). El calibre roscado (5) se pone en contacto con un reloj comparador de una apreciación de 0,01 mm para medir el desplazamiento axial. El valor de la fuerza ejercida se determina mediante una carta dinamométrica, previamente calibrada, que establece la relación entre la fuerza de bruñido y el desplazamiento axial correspondiente.

2.3 Preparación de las Probetas

Se prepararon probetas (Figura 2), a partir de una barra laminada en frío de 65 mm de diámetro. El diámetro exterior de las probetas, D_p , es de 63 mm.

Este valor sigue la relación entre dicho diámetro y el diámetro del rodillo, D_{rod} , que según Odintsov [8] debe ser:

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

$$\frac{D_p}{D_{rod}} = \frac{63}{41} = 1,53$$

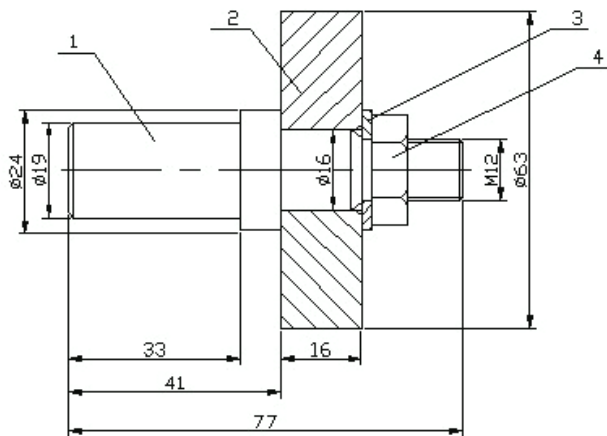


Figura 2. Esquema de montaje de la probeta: (1) mandril, (2) probeta, (3) arandela de sujeción, (4) tuerca.

Para garantizar el acabado superficial previo al tratamiento, la probeta se cilindró exteriormente con los siguientes datos de corte: avance de 0,09 mm/rev, 1 mm de profundidad de corte en una pasada, 850 rpm de frecuencia de giro y 173,57 m/min de velocidad de corte.

Las mediciones de la dureza superficial se realizaron con un durómetro Vickers HECKERT HMO 10 aplicando una fuerza de 98,1N (10 kgf) durante 15 s, de acuerdo a la norma ASTM E92-82(2003). En el inciso 5.1.2 de la misma norma, se establece que la superficie de la muestra debe estar preparada de tal manera que se definan claramente los extremos de las diagonales y se puedan medir con una precisión de $\pm 0,5\%$ de la longitud de las diagonales. Las mediciones efectuadas en este trabajo satisficieron dicho requerimiento.

La rugosidad superficial se determinó en un rugosímetro HOMMELWERKE T 1000. El diámetro exterior se midió con un micrómetro de exteriores MITUTOYO de 50–75 mm con una apreciación de 0,01 mm.

Las condiciones iniciales de las muestras a deformar fueron: dureza $216,81 \pm 11,865$ HV, rugosidad, $0,760 \pm 0,254$ μm y diámetro exterior de $62,320 \pm 0,493$ mm.

2.4 Máquina y Equipamiento

En la Figura 3 se muestra la instalación de una probeta en el torno convencional, con el rodillo simple acercándose a ésta.

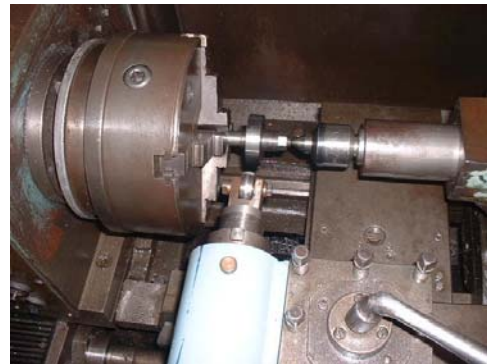


Figura 3. Proceso de bruñido por rodillo en el torno paralelo convencional

La herramienta de bruñir fue instalada en un torno paralelo convencional, modelo C-11 MT (Bulgaria), mostrado en la Figura 3.

Todas las mediciones, antes y después del bruñido, se realizaron cuidadosamente siguiendo los procedimientos normalizados y aplicando procesos estadísticos.

2.5 Procedimiento

Las variables independientes consideradas en el modelo experimental son: fuerza compresiva A (N), avance B (mm/rev) y número de pasadas C. En la

Tabla 2 se muestran los parámetros de entrada y sus niveles de variación.

Tabla 2. Parámetros de entrada del experimento.

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

Otros parámetros empleados y que se mantuvieron constantes fueron:

- La velocidad de bruñido a una frecuencia de giro constante de 150 rpm, resultando en una velocidad de trabajo de 29,68 m/min. Estos valores se consideran bajos para evitar la posibilidad de falta de rigidez del sistema.
- La lubricación, en la que se empleó un aceite industrial soluble al 5% en agua.

Ambas variables se fijaron para obtener un modelo experimental con un número de corridas que no sea excesivo y que garantice confianza en los resultados.

Los parámetros del bruñido por rodillo empleados en este trabajo están resumidos en la Tabla 3, donde N = número de experimento, \overline{Ra}_f = Rugosidad superficial media final (μm) medida en la dirección paralela a la dirección del movimiento de la herramienta, \overline{HV}_f = Dureza Vickers media final, medida en seis lugares equidistantes de la superficie bruñida alrededor de las probetas, \overline{De}_f = Diámetro exterior medio final en mm.

2.6 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental del tipo factorial de múltiples niveles, por la utilidad de la información que proporciona y por la facilidad de procesamiento; también por existir referencias de su empleo en investigaciones de materiales sometidos a este tipo de tratamiento superficial [1,3,11,15].

Para definir y establecer el rango y los niveles de las variables se realizó un experimento previo [14], donde se constató que el número de pasadas de la herramienta, variando entre tres y cinco, tiene una influencia poco significativa en las cualidades superficiales de las muestras, Tabla 2, lo que permite disminuir la cantidad de ensayos

experimentales, ahorrar material, disminuir el tiempo en los ensayos y mantener un nivel satisfactorio de seguridad estadística en los resultados. Esto da un modelo con un diseño factorial que resulta en 18 experimentos. Cada uno de ellos se replicó 3 veces, para obtener un total de 54 ensayos experimentales.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 3 se presenta el promedio de los resultados experimentales asociados a los niveles aplicados de fuerza, avance y número de pasadas de la herramienta.

Tabla 3. Resultados experimentales.

N	A (N)	B (mm/rev)	C	\overline{Ra}_f (μm)	\overline{HV}_f	\overline{De}_f (mm)
1	1000	0,066	3	0,16	222	63,191
2	1500	0,066	3	0,13	222	63,273
3	2000	0,066	3	0,12	239	62,963
4	1000	0,147	3	0,22	245	62,858
5	1500	0,147	3	0,15	247	62,904
6	2000	0,147	3	0,16	253	62,965
7	1000	0,228	3	0,30	216	63,347
8	1500	0,228	3	0,21	219	63,217
9	2000	0,228	3	0,18	254	62,915
10	1000	0,066	5	0,11	220	63,197
11	1500	0,066	5	0,12	219	63,26
12	2000	0,066	5	0,11	240	62,916
13	1000	0,147	5	0,18	242	62,919
14	1500	0,147	5	0,16	245	62,928
15	2000	0,147	5	0,15	242	62,937
16	1000	0,228	5	0,27	222	63,263
17	1500	0,228	5	0,15	217	63,228
18	2000	0,228	5	0,17	241	62,903

Para el análisis estadístico de los valores obtenidos experimentalmente se utilizó el paquete estadístico STATGRAPHICS® Plus v.4.1; con el cual se determinó el comportamiento de la dureza superficial, de la rugosidad superficial y del diámetro exterior de la probeta en función de las variables de entrada mencionadas, mediante diagramas de Pareto, las superficies de respuesta producidas y modelos matemáticos obtenidos.

3.1 Dureza Superficial

El modelo matemático, Ec. (2), que describe la influencia de las variables independientes consideradas, así como de las interacciones entre ellas, sobre el incremento de la dureza después del tratamiento, $dDureza$, tiene un coeficiente de regresión de 89,75%.

$$\begin{aligned} dDureza = & 60,38 - 0,06 A - 220,43 B + \dots \\ & \dots 0,24 A B + 0,013 A C + 255,07 B^2 + \dots \\ & \dots 24,26 B C + 0,00000001 A^2 C - 0,42 A B^2 - \\ & \dots 0,02 A B C \end{aligned} \quad (2)$$

En la Figura 4 se muestra el *Diagrama de Pareto*, que ilustra los efectos estandarizados de las variables. Los parámetros que influyeron significativamente en el incremento de la dureza son: el avance en su componente cuadrática y en su interacción con la fuerza y la interacción de la componente cuadrática de la fuerza con el número de pasadas. En un segundo grupo hay una influencia de la componente lineal del avance y de la interacción de la componente cuadrática de dicho avance con la fuerza, así como la de las tres variables, posteriormente la de la componente lineal de la fuerza y de su interacción con el número de pasadas de la fuerza. El efecto menos significativo lo tiene la influencia de la interacción del avance y el número de pasadas.

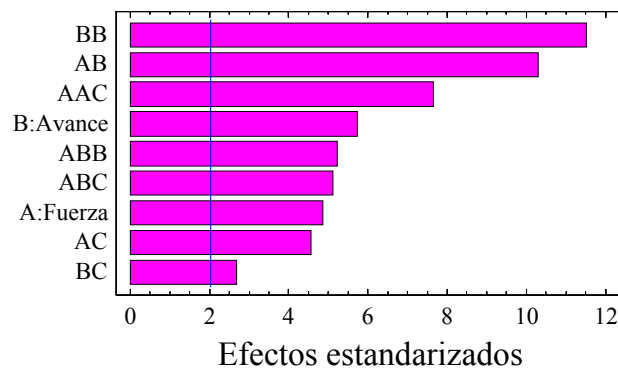


Figura 4. Diagrama de Pareto indicando la influencia de los parámetros de entrada en el incremento de dureza.

La cantidad de pasadas es estadísticamente significativa solo en sus interacciones con las variables restantes, dureza y avance. Como se puede apreciar en la Ecuación (2), no están incluidas las variables cuyas influencias no son significativas, lo cual se corrobora en el diagrama de Pareto.

En la Figura 5 se muestra la superficie de respuesta estimada para el incremento de la dureza al variar la fuerza, el avance y manteniendo constante 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. Además, se observa que los valores de los incrementos menores también corresponden al mayor valor de la fuerza aplicada, pero con la menor magnitud del avance (0,06 mm/rev.). En la Figura 6 se muestran los contornos de la Figura 5, en forma de isolíneas de incremento de dureza que representan todas las posibles combinaciones de avance y fuerza para obtener un incremento de dureza determinado.

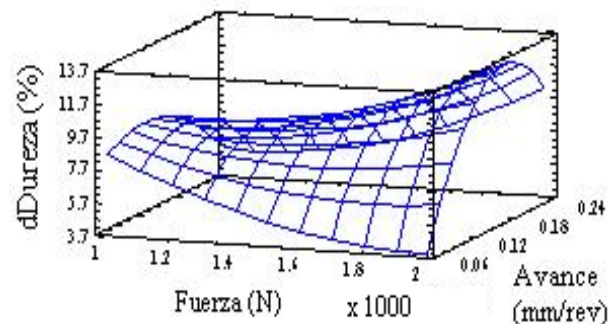


Figura 5. Superficie de respuesta estimada de la variación de dureza, para tres pasadas de la herramienta.

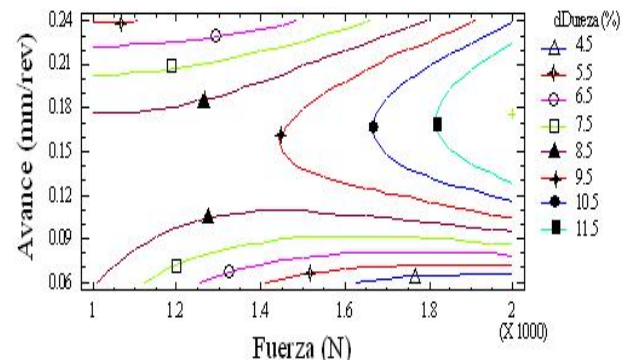


Figura 6. Contornos de la superficie de respuesta estimada, para tres pasadas de la herramienta.

La Tabla 4 ofrece los valores óptimos de los parámetros de entrada, estimados a partir del modelo matemático obtenido para maximizar el incremento de la dureza.

Tabla 4. Respuesta optimizada de los parámetros para el incremento de la dureza (Objetivo: Maximizar dDureza)

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Fuerza	1000,0	2000,0	1999,89
Avance	0,066	0,228	0,177
Pasadas	3,0	5,0	3,0

Valor óptimo = 13,092%

3.2 Rugosidad Superficial

El modelo matemático que describe la influencia de las variables independientes y sus interacciones sobre el incremento de la calidad superficial, dRugosidad, se muestra en la Ecuación (3), con un coeficiente de regresión de 91,23%.

$$dRugosidad = 60,50 + 0,06 A - 1055,07 B + \dots$$

$$\dots 12,16 C - 0,00002 A^2 - 0,007 A C + 4084,22 B^2 - \dots$$

$$\dots 1,94 A B^2 + 0,04 A B C \quad (3)$$

En la Figura 7 se observa que las componentes de los avances (lineales y cuadráticos) y de la fuerza tienen una influencia significativa en el mejoramiento del acabado superficial, también la interacción de la componente lineal de la fuerza y la cuadrática del avance, constituyendo de hecho las variables con los efectos mayores. En un grado menor resultan los efectos del número de pasadas y la interacción entre las tres variables independientes y casi despreciables los de la interacción entre la fuerza y el número de pasadas. La influencia de las restantes interacciones no es significativa desde el punto de vista estadístico.

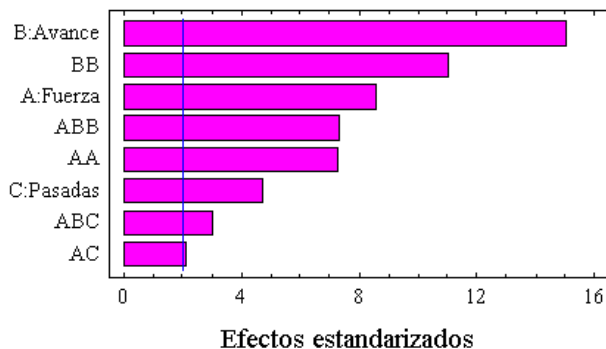


Figura 7. Diagrama de Pareto indicando la influencia de los parámetros de entrada en el mejoramiento del acabado superficial.

En la Figura 8 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.).

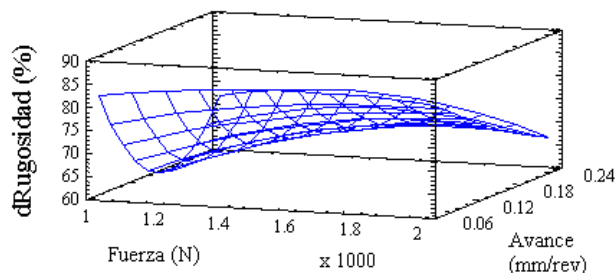


Figura 8. Superficie de respuesta estimada del mejoramiento de la calidad superficial, para tres pasadas de la herramienta.

De forma análoga al incremento de la dureza, los contornos de esta superficie de respuesta, en forma de isolíneas de incremento de la calidad de la superficie, representan las posibles combinaciones de fuerza y avance que permiten obtener determinado mejoramiento de la calidad superficial para tres pasadas de la herramienta (Figura 9).

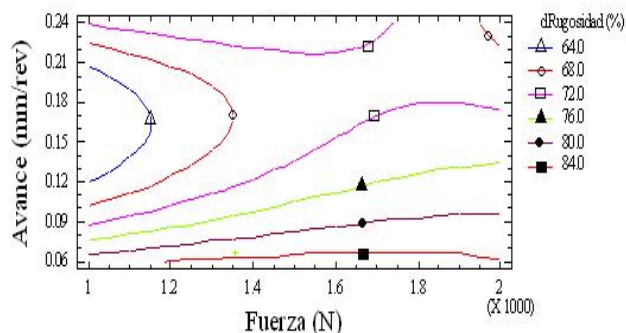


Figura 9. Contornos de la superficie de respuesta estimada, para tres pasadas de la herramienta.

Los valores de los parámetros de entrada, estimados a partir del modelo matemático, considerando el mejoramiento de la calidad superficial como criterio de maximización se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Respuesta optimizada de los parámetros para el mejoramiento del acabado superficial. (Objetivo: Maximizar dRugosidad)

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Fuerza	1000,0	2000,0	1356,29
Avance	0,066	0,228	0,066
Pasadas	3,0	5,0	4,99883

Valor óptimo = 88,4769%

No obstante, considerando que el efecto del número de pasadas es poco significativo y que su aumento no conlleva a un incremento sustancial en el mejoramiento de la calidad superficial y sí inconvenientes desde el punto de vista económico, se decide repetir este análisis prefijando el número de pasadas de la herramienta en tres. Los resultados se exponen en la Tabla 6.

Tabla 6. Respuesta optimizada de los parámetros para la máxima reducción de rugosidad, con tres pasos de herramienta (Objetivo: Maximizar dRugosidad)

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Fuerza	1000,0	2000,0	1715,18
Avance	0,066	0,228	0,066
Pasadas	3,0	3,0	3,0

Valor óptimo = 84,2845%

Con esta combinación óptima de los parámetros del régimen de bruñido, se mejora la calidad de la superficie casi en un 84,3 %.

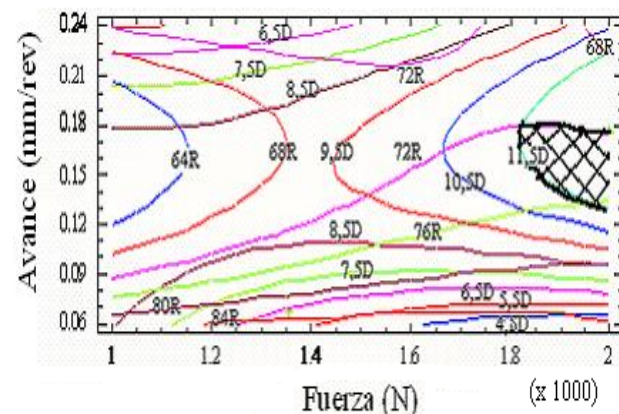
3.3 Análisis Combinado del Comportamiento de la Dureza y la Rugosidad Superficial

Después de analizar el comportamiento de la dureza y de la rugosidad superficial se obtiene la Figura 10, que muestra la superposición de las isolíneas de las Figuras 6 y 9.

Con esta gráfica es posible seleccionar las combinaciones de avance y fuerza que ofrezcan los mayores incrementos de dureza y de calidad superficial, para tres pasadas de la herramienta. Para simplificar la interpretación se ha establecido una notación: 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.

A la derecha de la Figura 10 se muestra una zona achurada, 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%).

**Figura 10.** Superposición de los contornos de las superficies de respuestas estimadas de incremento de la dureza y la calidad superficial, para tres pasadas de la herramienta.

3.4 Diámetro Exterior

Al procesar los resultados experimentales, no se encontró un modelo matemático capaz de describir la influencia de las variables independientes consideradas, ni de sus interacciones en la disminución del diámetro exterior, por lo que no existe un coeficiente de regresión ajustado para los grados de libertad ($R^2 = 0$).

Con el objetivo de determinar si el tratamiento influye significativamente o no en la variación del diámetro, se realizó un análisis comparativo de las magnitudes de los diámetros antes y después del tratamiento de bruñido de cada muestra, concluyéndose que no existen diferencias significativas antes y después según se demuestra en los resultados de las pruebas estadísticas.

También se analizaron los valores de la disminución del diámetro en cada una de las corridas experimentales mediante el ensayo de comparación de muestras pareadas con el objetivo de establecer la magnitud del intervalo de variación.

Puede asegurarse que el tratamiento no influye de manera significativa en la disminución del diámetro. La existencia de una pequeña disminución del diámetro está determinada por la capacidad del acero AISI 1045 para ser deformado bajo el efecto

de los parámetros de bruñido considerados en esta investigación experimental.

4. CONCLUSIONES

- Se obtuvieron modelos matemáticos que indican la influencia de la fuerza, el avance y el número de pasos aplicados a las muestras en la dureza superficial y la rugosidad superficial.
- Se obtiene un aumento de la dureza superficial. El mayor valor incremental, 13%, se alcanzó con una fuerza de 2000 N, un avance de 0,18 mm/rev y 3 pasadas de la herramienta.
- Se logra un incremento considerable de la calidad superficial, el máximo fue 88,5%, se obtiene con una fuerza de 1356 N, un avance de 0,066 mm/rev y 5 pasadas de la herramienta; considerando el aspecto económico, se recomienda utilizar una fuerza de 1715 N, un avance de 0,066 mm/rev y 3 pasadas de la herramienta lográndose un aumento de 84,3%.
- En el análisis del comportamiento de la disminución del diámetro exterior no se halló un modelo matemático capaz de describir el comportamiento de esta variable por lo que se considera que el tratamiento aplicado no influye de manera significativa.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Orbis Pérez F., a Lázaro Pino R. y a Erandi González R. por su colaboración y útiles aportes en la elaboración de este trabajo.

6. REFERENCIAS

- [1] Díaz S. *Implementación de un Procedimiento Metodológico para la Elaboración de Piezas por Bruñido con Rodillo Simple*, Tesis doctoral. Santa Clara (Cuba): Universidad Central de Las Villas, 2006.
- [2] Hassan AM, *J. Mater. Proces. Tech.* 1997; **72** (3): 385-391.
- [3] Hamadache H, Laouar L, Zeghib NE, Chaoui K, *J. Mater. Proces. Tech.* 2006; **180** (2):130-136.
- [4] El-Khabeery MM, El-Axir MH, *Int. J. Mach. Tool Manu.* 2001; **41** (12): 1705-1719.
- [5] Ebeid S, El-Taweel TA, *Proc. IMechE, Part B, Journal of Engineering Manufacture.* 2005; **219** (5): 423-430.
- [6] El-Axir MH, *Int. J. Mach. Tool Manu.* 2000; **40** (11): 1603-1617.
- [7] Ogburn F, *Cutting Tool Engineering* 2001; **53** (6): 54-57.
- [8] Odintsov LG. *Endurecimiento y Acabado de Piezas por Deformación Plástica Superficial. Manual.* Moscu (URSS): Editorial Mashinostroenie, 1987, Cap. 2.
- [9] El-Tayeb NSM, Low KO, Brevern PV, *J. Mater. Proces. Tech.* 2007; **186** (1-3): 272-278.
- [10] Al-Qawabeha UF, *Mach. Sci. Technol.* 2007; **11** (1): 145-155.
- [11] El-Axir MH, El-Khabeery MM. *J. Mater. Proces. Tech.* 2003; **132** (1-3): 82-89.
- [12] Pacana A, Korzynski M, *The Third International Scientific Conference, MECHANICS 2002.* Scientific Bulletins of Rzeszów University of Technology **193**, Mechanics 58.
- [13] Lee SSG, Tam SC, Loh NH, *J. Mater. Proces. Tech.* 1992; **29** (1-3): 203-211.
- [14] Díaz S, Robert T, *Revista Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo* 2005; **2** (7): 32-40.
- [15] Loh NH, Tam SC, Miyazawa S. *J. Mech. Work. Technol.* 1989; **18** (1): 53-61.