

Bruñido con rodillo en acero AISI 1045

Díaz, Silvio* y Robert, Teresita**

*Departamento de Procesos Tecnológicos, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

** Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, Universidad Autónoma de México
robertn@servidor.unam.mx

Resumen

El bruñido por rodillo o rodilado es una deformación plástica superficial que mejora el acabado superficial de la pieza y que incrementa la dureza superficial, la resistencia a la fatiga, al desgaste y a la corrosión. En este trabajo utilizó un torno paralelo con una herramienta de bruñir de rodillo simple y probetas de acero AISI 1045 determinó el efecto de la fuerza, el avance y el número de pasos en la rugosidad, la dureza superficial, la variación en el diámetro de la pieza y la profundidad de la capa deformada. La experimentación se realizó con lubricación aplicó un diseño experimental factorial completo de $N = 2^3$. La información obtenida se procesó con el software estadístico STATGRAPHICS Plus versión 4.1 para Windows. Se presentan las ecuaciones matemáticas que representan el comportamiento del incremento de dureza, rugosidad y la disminución del diámetro en función de las variables utilizadas. Se concluye que el rodilado disminuye la rugosidad, aumenta la dureza superficial y disminuye el diámetro exterior de la probeta, en orden decreciente de influencia. El mayor aumento de la dureza superficial se obtiene con la interacción entre la fuerza y el avance. El mayor efecto en la rugosidad lo proporciona el avance la reducción del diámetro la mayor influencia es la combinación de la fuerza y el avance.

Palabras clave: Bruñido por rodillo simple, rodilado, herramienta de bruñido, acabado superficial, dureza superficial.

Roller burnishing on 1045 AISI steel

Abstract

Roller burnishing consists in a surface deformation which improves surface hardness, surface finishing, surface resistance, fatigue strength and corrosion strength. A conventional lathe with a single roller burnishing tool was used with 1045 AISI carbon steel specimens. The effect of three roller burnishing parameters, force, feed and number of passes on surface finishing, surface hardness, diameter variation and depth of the deformed layer is established. The experimentation was carried out properly lubricated. A complete factorial experimental design was applied, $N = 2^3$. The obtained information was processed with the STATGRAPHICS Plus Version 4.1 for Windows statistical software. Mathematical equations relating hardness and roughness increments and diameter diminution as a function of used variables are presented. It is concluded that roller burnishing lowers roughness, increases surface hardness and diminishes work piece diameter, in decreasing order of influence. The highest surface hardness increase is obtained with the force and feed interaction. In roughness, the greatest effect is feed. The greatest influence on the diameter is the interaction between force and feed.

Keywords: single roller burnishing, burnishing tool, surface finishing, surface hardness.

Recibido: 29-04-05 Revisado: 27-04-07

1. Introducción

La deformación plástica superficial, en particular el proceso de rodilado o bruñido con rodillo, constituye un método de tratamiento superficial de las piezas para incrementar sus cualidades físico-mecánicas y de acabado superficial aprovechando la plasticidad de los metales. Este proceso evita, en muchos casos, el empleo de procesos tecnológicos tradicionales como el rectificado, los tratamientos térmicos y los tratamientos termo-químicos, que altamente consumidores de energía y potencialmente contaminadores del medio ambiente.

Este método de elaboración no requiere de equipamiento tecnológico adicional, solo el uso del herramienta específica para su aplicación y del conocimiento del régimen apropiado de trabajo a partir del tipo de material tratado y el resultado deseado (buen acabado superficial, resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga, etc.).

Por el volumen y actualidad de las referencias bibliográficas consultadas, se puede afirmar que los tratamientos de deformación plástica superficial, específicamente el bruñido por rodillo, se han convertido en una operación

acabado superficial, especialmente en bridas por rodamiento, se han convertido en una operación secundaria de acabado muy popular (Díaz, 2002).

El objetivo de este trabajo es establecer un modelo matemático que relacione la fuerza, el avance y el número de pasos con valores de incrementos de dureza, rugosidad, dureza superficial y disminución del diámetro final de piezas bruñidas. Para esto, se investiga el proceso de bruñido por rodillo simple en piezas de acero AISI 1045 empleando un torno paralelo convencional.

2. Desarrollo

2.1 Material

Se utilizó acero AISI 1045, caracterizado químicamente y metalográficamente.

Para el análisis químico se utilizó un espectrómetro de emisión atómica Spectrum modelo Spectrocast y para metalográfico un microscopio óptico metalográfico Neophot- 32. La composición química se muestra en la Tabla 1 y la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas del acero determinadas en una máquina universal ZD-40 observándose una microestructura ferrítico-perlítica, típica de este acero.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 1045 utilizado

Elementos	%
Carbono	0.480
Manganeso	0.630
Silicio	0.369
Cromo	0.168
Fósforo	0.027
Azufre	0.037

Este acero al carbono puede ser rectificado y tratado térmicamente y compararse con los métodos tradicionales de aumento de la dureza superficial (carburizado, nitrurado, etc.)

(Gómez, 2003) ha empleado este material en las camisas de los cilindros hidráulicos tratados superficialmente mediante deformación plástica mediante rodillo.

(Gómez, 2003) y (Lee, 1992) consideran que es preferible utilizar aceros de bajo carbono y no aleados para bruñidos porque poseen mayor plasticidad –debido a su estructura ferrítica– que los aceros de contenidos de carbono superiores. La estructura ferrítica permite una mayor deformación y, en consecuencia, una mayor calidad de acabado superficial.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero caracterizado

Límite de resistencia (MPa)	673
Límite de rotura (MPa)	598
Límite de fluencia (MPa)	353
Elongación (%)	14
Estricción (%)	35
Módulo de elasticidad (GPa)	210

2.2 Probetas

Se obtuvieron a partir de una barra cilíndrica laminada en frío, de 65 mm de diámetro. El diámetro exterior nominal de la probeta, D_p , es de 63 mm que sigue la relación establecida por (Odintsov, 1987) entre los diámetros del rodillo, D_{rod} , y de la muestra, E_{cs} . (1) y (2):

$$2.5 > \frac{D_p}{D_{rod}} > 1.5 \quad (1)$$

$$\frac{D_p}{D_{rod}} = \frac{63}{41} = 1.53 \quad (2)$$

2.3 Herramienta empleada

En la Fig. 1 se muestra la herramienta fabricada. El cuerpo de la herramienta es de acero AISI 1045. El rodillo tiene 41 mm de diámetro y es de acero AISI D2 con una dureza de 58 HRC y un acabado superficial de 0.8 μm ; el rodillo simple montado entre apoyos con un sistema de carga mecánico. El perfil tiene un radio de 207.5 mm para la elaboración de superficies con la salida libre de la herramienta. El muelle de la herramienta fue calibrado con

elaboración de superficies con la salida libre de la herramienta. El muelle de la herramienta fue calibrado con dinamómetro certificado y avalado por el Instituto Nacional de Investigaciones Metrológicas de la República de Cu

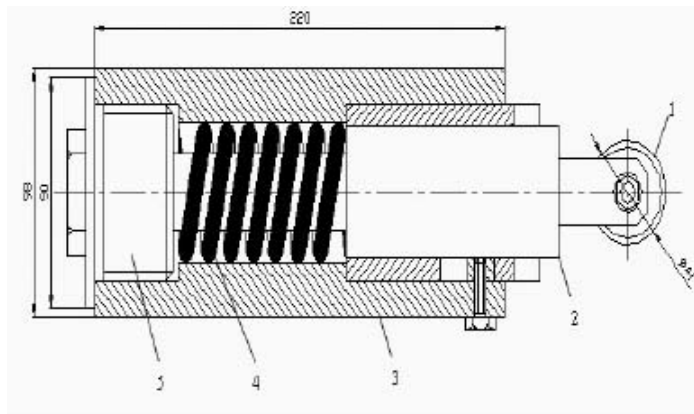


Fig. 1. Esquema de la herramienta de bruñir por rodillo simple, dimensiones en mm. 1. Rodillo, 2. Vástago, 3. Cilindro, 4. Muelle, 5. Calibrador roscado.

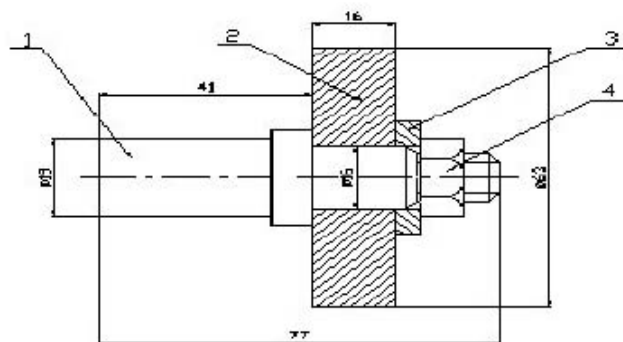


Fig. 2. Esquema de montaje de la probeta en el mandril, dimensiones en mm. 1. Mandril, 2. Probeta, 3. Arandela de sujeción, 4. Tuerca.

La herramienta de bruñir se instaló en el portaherramienta de un torno paralelo convencional modelo C-11 M fabricación búlgara, Fig. 2.

Los parámetros de entrada son: avance (A, mm/rev), fuerza (F, N), y número de pasos (P). Los de respu (salida): acabado superficial (Ra, μm), dureza superficial (HV, kg/mm^2), profundidad de la capa deformada (p, n diámetro final de las piezas rodiladas (Df, mm).

3. Diseño experimental

Se aplica un diseño experimental del tipo factorial completo (Hernández Sampieri, 1997; Loh et al, 1989) utiliz: el modelo $N = 2^k$ donde $k = 3$ variables: X_1 : fuerza, X_2 : avance y X_3 : número de pasos y se proponen 2 niv (máximo y mínimo), Tabla 3. Se mantiene un nivel satisfactorio de seguridad estadística en los resultados, coi diseño factorial simple 2^3 que resulta en 8 corridas experimentales. En cada una de ellas se utilizaron 3 répl para un total de 24 corridas

4. Procedimiento experimental

Inicialmente se requieren bajos valores de rugosidad, entre 3.2 y 6.3 μm , (El-Axir, 2000) para obtener un t acabado superficial final. Las probetas se maquinaron con el régimen de corte:

Tabla 3. Condiciones del maquinado y rodilado de las probetas

Parámetros	Maquinado	Rodilado
Velocidad periférica, n (rpm)	850	150
Velocidad lineal, V (m/min)	173.57	29.68
Avance, A (mm/rev)	0.066	
Dos pasos, p (mm)	1.75	

El valor de velocidad utilizado en el rodilado se encuentra dentro del rango recomendado por (El-Axir, 2000) para bruñido de piezas de acero al carbono.

Se midieron las condiciones iniciales de las probetas:

- Rugosidad superficial (R_a) con un rugosímetro electromecánico Mitutoyo, modelo SURFTEST – III.
- Diámetro exterior con el micrómetro de exteriores Mitutoyo de 50 – 75 mm, precisión 0,01mm.
- Dureza HV con un durómetro Vickers marca Heckert, modelo HMO 10U, con carga de 98 N.

En el torno paralelo, la herramienta fue montada en el portaherramienta y las probetas con su mandril colocadas entre plato y punto. A la herramienta le fue acoplado un indicador de carátula con una precisión de 0,01 mm mediante la carta dinamométrica del muelle de la herramienta previamente obtenida, permite determinar exactitud la fuerza del rodillo ejercida sobre la probeta. Se lubrica con aceite soluble en agua al 5%.

A las probetas rodiladas se les midió: rugosidad superficial, diámetro exterior y dureza superficial. Además realizaron mediciones de microdureza subsuperficial para determinar la profundidad de la capa endurecida producida con un microdurómetro Vickers marca Shimadzu, modelo M. Todo el equipamiento está debidamente certificado aprobado por la Oficina Nacional de Normalización de la República de Cuba.

5. Resultados y discusión

Para procesar los valores experimentales se emplea el paquete estadístico profesional STATGRAPHICS® Plus Ver 4.1 para Windows, de Statistical Graphics Corp., conformándose para cada propiedad el modelo empírico matemático correspondiente. El grado de la influencia de los distintos factores en cada propiedad será analizado más adelante.

5.1 Dureza

En la Tabla 4 se aprecian los valores obtenidos de las diferencias de las durezas después del tratamiento en las réplicas.

Tabla 4. Resultados de la variación de dureza después del tratamiento

No.	Diferencias (%)			Y	S	CV (%)
1	8.478	8.677	8.412	8.523	0.157	1.84
2	5.976	6.075	6.056	6.036	0.059	0.97
3	6.687	6.488	6.223	6.466	0.274	4.24
4	6.911	6.849	7.227	6.996	0.223	3.19
5	7.592	7.359	7.337	7.489	0.151	2.01
6	6.600	6.313	6.413	6.442	0.170	2.64
7	6.443	6.090	6.317	6.283	0.208	3.32
8	7.838	8.019	8.013	7.957	0.107	1.35

Y = Valor medio, S = Desviación estándar, CV = Coeficiente de variación.

Las tres columnas enmarcadas en las diferencias porcentuales corresponden a cada una de las réplicas, además muestran los valores medios (Y), la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV en %) con respecto al valor medio. Según Shirakov, 1985, para tres réplicas el valor de dicho coeficiente no debe ser mayor de 4 por 5% de error (95% de confianza).

En el análisis de varianza, ANOVA, (Hernández Sampieri, 1997) se obtuvo un coeficiente de regresión de $F_{96,91\%}$. Se consideran valores aceptables 90% o más.

La Ec. (3) representa la influencia de los parámetros experimentales individuales y combinados en la diferencia de dureza:

$$d_{\text{DUREZA}} = 22.4223 - 0.01F + 54.412a + 0.036FA + 0.013FP + 2.041AP \quad (3)$$

En la Ec. (3), se aprecia que la interacción entre la fuerza y el avance tiene una alta influencia en el incremento de dureza cuando la fuerza tiende a aumentar y el avance está próximo a sus valores máximos; tiene un efecto opuesto cuando el avance está próximo a sus valores mínimos. Algo similar ocurre con las interacciones entre la fuerza y el número de pasos, y entre el avance y el número de pasos. No se expresa el número de pasos porque no tiene influencia en la diferencia de dureza, según se corrobora con el diagrama de Pareto, Fig. 3. Como se observa, las interacciones entre las variables consideradas tienen una mayor influencia que las variables individuales.

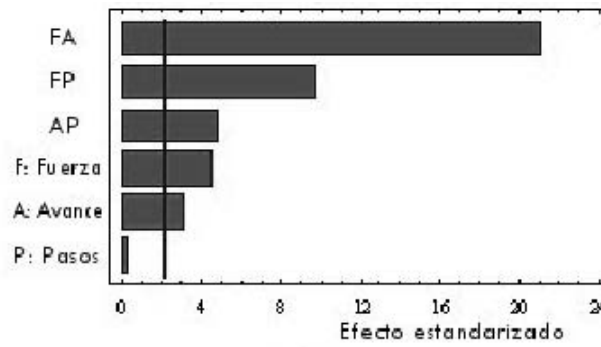


Fig. 3. Efectos de la fuerza, el avance y el número de pasos sobre la variación de la dureza.

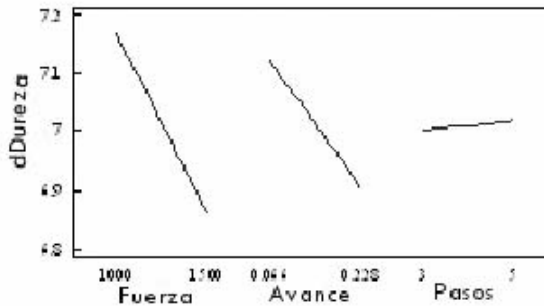


Fig. 4. Representación de los efectos principales sobre la variación de la dureza.

En la Fig. 4 se muestra la influencia de las variables; a medida que la fuerza y el avance aumentan el incremento de la dureza disminuye, con el número de pasos ocurre lo contrario pero no es significativo.

(Dieter, 1998) muestra que las curvas esfuerzo y dureza Vs. deformación de un mismo material son similares y el endurecimiento por deformación afecta de la misma forma tanto al esfuerzo como a la dureza. Por lo que puede explicar la disminución en el incremento de dureza a partir de una curva esfuerzo deformación.

La Fig. 5 es la curva esfuerzo real - deformación real del acero 1045. Están indicados dos incrementos de deformación, el primero entre 0.03 y 0.06 y el segundo entre 0.21 y 0.24 aproximadamente, el mismo incremento de deformación en ambos, 0.03. La diferencia de esfuerzos es de alrededor de 70 MPa para el primer incremento de 18 para el segundo, esto es debido al endurecimiento por deformación del acero. La dureza presenta el mismo comportamiento, por lo que es comprensible que al aumentar la deformación el incremento en dureza disminuya.

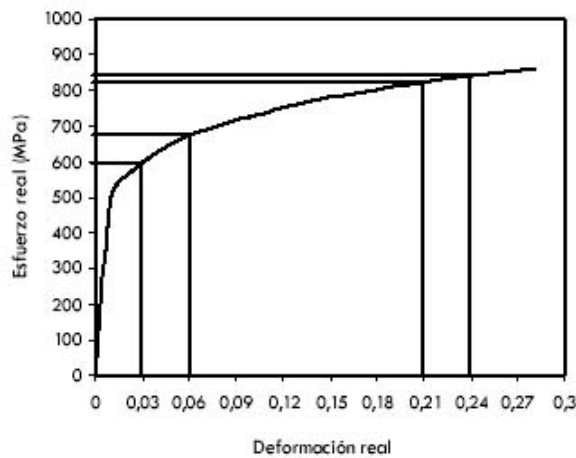


Fig. 5. Curva esfuerzo real - deformación real del acero 1045 mostrando iguales incrementos de deformación que resultan en diferentes incrementos de esfuerzos debido a la zona en la que se produce la deformación.

En las Figs. 6 y 7 se muestran las superficies de respuestas estimadas de la variación de dureza, para 3 y 5 pasos la herramienta. El mayor incremento de dureza se consigue con una fuerza de 1000 N, un avance de 0,066 mm y 3 pasos, Fig. 6. Otro incremento considerable, aunque menor que el anterior, se aprecia en la figura 7, con fuerza de 1500 N, un avance de 0,228 mm/rev y 5 pasos.

De acuerdo con la Fig, 5, el incremento de la dureza es función de la deformación, lo cual explica que la super estimada de respuesta de la deformación en cinco pasos sea más plana que la de tres pasos.

5.2 Rugosidad

De acuerdo a (Shirakov, 1985), el coeficiente de variación de los datos obtenidos respecto a la media no debe mayor de 4 para garantizar una confiabilidad de 95%, en el caso de las diferencias de rugosidad dicho coefici varía entre 0.23 y 3.99, lo cual nos garantiza la repetibilidad.

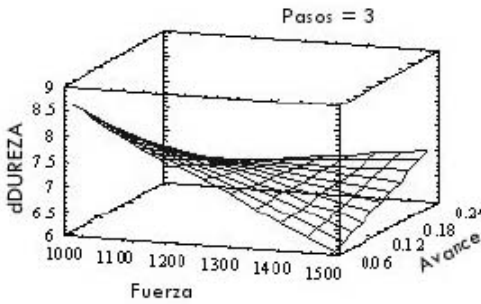


Fig. 6. Superficie estimada de respuesta para la variación de dureza, tres pasos de la herramienta.

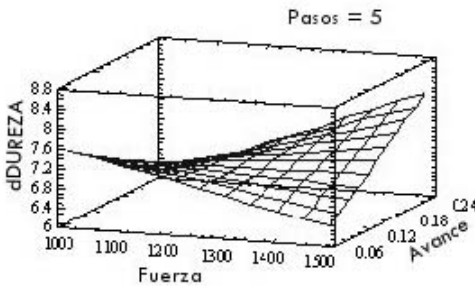


Fig. 7. Superficie estimada de respuesta para la variación de dureza, cinco pasos de la herramienta.

El modelo empírico-matemático, Ec. (4), da un coeficiente de regresión $R^2= 0.93$.

$$dRUGOSIDAD= 96.729-0.0133F-132.662^a+0.0046FP \quad (4)$$

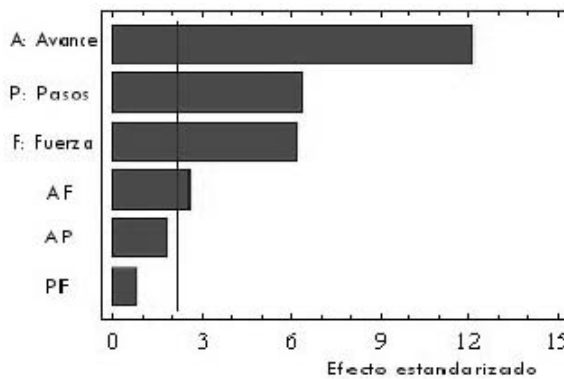
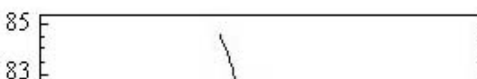


Fig. 8. Efectos del avance, número de pasos y sobre la variación de la rugosidad.

Como se muestra en la Ec. (4) y se confirma en la Fig. 8, existe un efecto significativo de las tres varia analizadas, siendo el mayor el del avance, después el número de pasos y por último la fuerza; así como un ef poco significativo de la interacción entre la fuerza y el número de pasos.



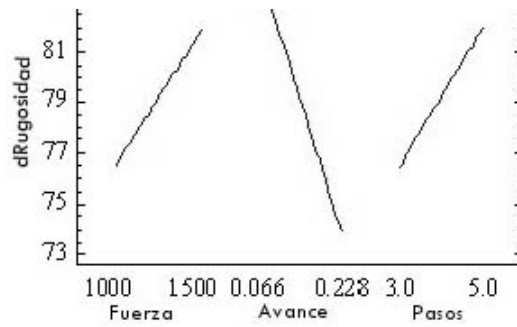


Fig. 9. Representación de la fuerza, el avance y el número de pasos sobre la variación de la rugosidad.

En la Fig. 9 se expone que la fuerza y el número de pasos tienen un efecto casi similar al variar del valor mínimo máximo, originando un mejoramiento de la calidad superficial. El efecto del avance es contrario, pese a que ha mejoramiento superior de la calidad superficial.

Respecto a las interacciones entre la fuerza y el avance y entre la fuerza y el número de pasos, Ec. (4), arrojan un efecto positivo que es más acentuado para los mayores valores de avance (0,228 mm/rev) y número de pasos (5). En la interacción entre el avance y el número de pasos el efecto es negativo, o sea al aumentar simultáneamente ambas variables, disminuye la diferencia de rugosidad.

En la figura 10 se observa que la mayor diferencia de rugosidad se logra con una fuerza de 1500 N, un avance 0,066 mm/rev y 5 pasos; otro incremento considerable, aunque menor que el anterior, se puede apreciar con fuerza de 1500 N, un avance de 0,066mm/rev y 3 pasos; este comportamiento se ajusta perfectamente a (El , 2003). Los mayores valores de diferencias (que se traduce en un incremento de la calidad superficial o disminución de la rugosidad superficial) obtenidos en estos experimentos corresponden a la rugosidad.

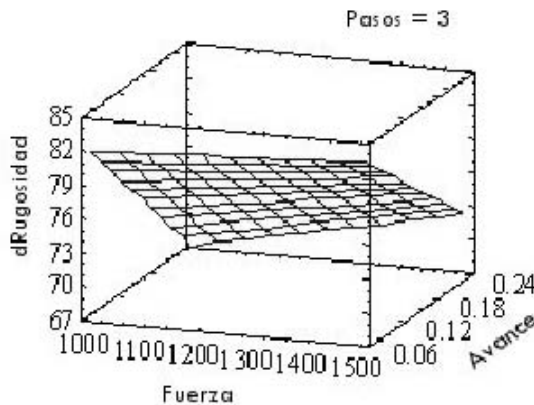


Fig. 10. Superficie estimada de respuesta de la variación de las diferencias de rugosidad, para 3 pasos de la herramienta.

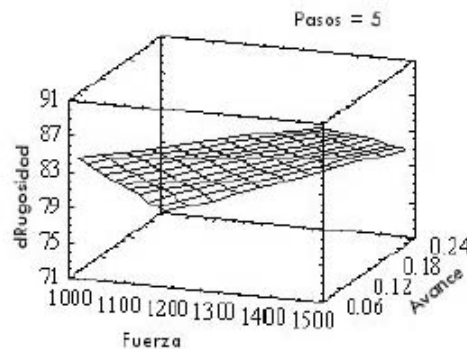


Fig. 11. Superficie estimada de respuesta de la variación de las diferencias de rugosidad, 5 pasos de la herramienta.

5.3 Diámetro

El coeficiente de variación de las diferencias entre los datos de los experimentos es el siguiente: $C_v = \frac{s}{\bar{x}}$

El coeficiente de variación de las diferencias porcentuales de diámetro con respecto al valor medio están entre 0.2909%, lo cual da una confiabilidad muy baja en los resultados, de acuerdo a (Shirakov, 1985).

Lo anterior se corrobora en el diagrama de Pareto, Fig. 12. las variables analizadas no influyen significativamente la variación de las diferencias del diámetro, con excepción de la interacción entre la fuerza y el avance.

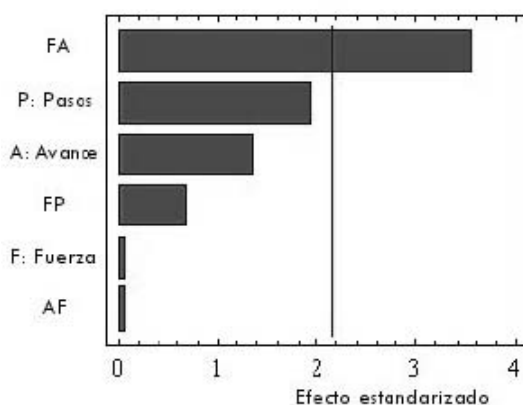


Fig. 12. Efectos de la fuerza, el avance y el número de pasos en la variación del diámetro.

El efecto de la interacción entre la fuerza y el avance es positivo cuando ambas variables aumentan, aunque para valores de avance inferiores al valor medio del intervalo analizado; para avances superiores el efecto contrario.

La ecuación que representa la influencia de las variables estudiadas, en la variación de las diferencias de diámetro Ec. (5) tiene un coeficiente de regresión de 0.4537, menor que el valor aceptado (0.90).

$$d_{\text{DIAMETRO}} = -5.2905 \cdot 10^3 - 7.1468 \cdot 10^5 FA \quad (5)$$

Las superficies de respuestas estimadas de la variación de las diferencias del diámetro no se consideran porque el valor obtenido del coeficiente de regresión, R^2 , es bajo lo que trae como consecuencia que el modelo empírico-matemático no sea el adecuado y dichas superficies no ilustren el comportamiento de las variables. Resulta benéfico porque al no influir las variables que se experimentaron y obtenerse valores porcentuales de disminución de diámetros muy bajos (entre 0.012 y 0.018%), se garantiza que con el bruñido se logran disminuciones tan pequeñas de variaciones del diámetro que no sobrepasan los valores de tolerancias estimados en este proceso.

5.4 Profundidad de capa endurecida

No es posible hablar de una influencia de las variables analizadas en la profundidad de la capa endurecida, porque el modelo empírico-matemático obtenido no se ajusta a los valores de las mediciones realizadas ($R^2 = 53\%$) y el coeficiente de variación respecto al valor medio varía entre 0.97 y 4.24, lo cual da baja confiabilidad. En este sentido es evidente que se hace necesario perfeccionar la forma de realizar las mediciones.

6. Conclusiones

El efecto logrado por el bruñido con rodillo es: mejoría en el acabado superficial, aumento de la dureza superficial y disminución del diámetro exterior de las probetas de acero 1045, en orden decreciente.

En el análisis del aumento de las diferencias de la dureza superficial la mayor influencia la tienen las interacciones entre las variables (fundamentalmente entre la fuerza y el avance). El mayor incremento se consigue con una fuerza de 1000 N, un avance de 0,066mm/rev y 3 pasos de la herramienta, esto se explica debido al endurecimiento del material y al rango de deformaciones en que se realiza esta operación: mientras mayor sea la deformación menor será la diferencia de endurecimiento.

Para el mejoramiento de la calidad superficial la mayor influencia está dada por las variables independientes en primer lugar el avance. El mejor acabado superficial se logra con una fuerza de 1500 N, un avance de 0,066 mm y 5 pasos.

Cuando se analiza la disminución del único parámetro geométrico estudiado, el diámetro exterior, la influencia significativa es la interacción entre fuerza y avance. El resto de las variables no influyen en esta disminución. Como las variaciones, al ser muy pequeñas, puede estar incluidas dentro de los valores tolerados, y así evitar pérdidas de material.

Respecto a la profundidad de la capa endurecida, las pruebas realizadas no permitieron concluir la influencia de las variables analizadas puesto que el modelo empírico-matemático obtenido no describe el comportamiento real.

variables analizadas puesto que el modelo empírico matemático obtenido no describe el comportamiento de dicha variable, $R^2 = 53\%$

Referencias

1. Díaz S, 2002, Caracterización del bruñido en la elaboración de acabado de piezas y sus ventajas, Memorias de Segunda Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica COMEC, Santa Clara, Cuba.
2. Dieter G, 1988, Mechanical metallurgy, McGraw-Hill Book Co., U. K., pp. 330
3. El-Axir MH, 2000, An investigation into roller burnishing, International Journal of Machine Tools and Manufact Vol. 40, Issue 11, September, UK, pp. 1603-1617.
4. El-Axir MH y El-Khabeery MM, 2003, Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristic various materials, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 132, Issue 1-3, January, The Netherlands, 82-89.
5. Gómez V, Goytisolo R, Cabello JJ y Francisco W, 2003, Evaluación del empleo de aceros de bajo contenido carbono en la fabricación del cuerpo de cilindros oleohidráulicos, Revista Ingeniería Mecánica, Vol. 6, No. 2 Habana, pp. 7-11.
6. Hernández R, 1997, Metodología de la investigación, Editorial Mc Graw-Hill, México.
7. Hernández R, 2001, Puesta a punto de un dispositivo experimental para el rodilado de superficies cilíndricas exteriores, Tesis de Maestría, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba,.
8. Kosilova AG y Mescheriakov RK, 1985, Manual del tecnólogo en construcción de maquinaria, Tomo 2, Edit Mashinostroenie, URSS, pp. 383-397.
9. Lee SSG, Tam SC y Loh NH, 1992, An investigation into the ball burnishing of an AISI 1045 free-form surface, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 29, No. 1-3, January, The Netherlands, pp. 203-211.
10. Loh NH, Tam SC y Miyazawa S, 1989, A study of effects of ball-burnishing parameters on surface roughness and surface hardness using factorial design, Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 18, No. 1, January, The Netherlands, pp. 53-61.
11. Moya JC, 1996, Investigación teórico-experimental de la influencia del proceso de rodilado en las características microgeométricas y físico-mecánicas del acero 30XH3A, Tesis de Maestría, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
12. Odintsov LG, 1987, Endurecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial, Editorial Construcción de Maquinaria, URSS.
13. Statistical Graphics Corporation, 1999, User's Guide STATGRAPHICS Plus Version 4.1, USA.