

Mathematical model for surface roughness prediction on grinding steel parts

*Patricia Muñoz de Escalona, Omar Zurita, Zulay Cassier
y María Carolina Payares*

*Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Apartado 89000,
Caracas 1080, Venezuela*

Abstract

Due to the constant progress and exigencies of metalmechanics industries, they have been forced to look for highly accurate methods to predict a desired surface roughness value at a lower price. Although the grinding process, compared to other machining process (turning and milling), is a good one to remove material as well to obtain a good surface finish, requires a good control on the operative variables to guarantee a best surface finish.

Based on the influence of the grinding cutting variables, such as, workpiece speed (V_p), down feed (d) and different hardness for an AISI 1045 and AISI 4140 steel, a simple mathematical model for roughness R_a was obtained in order to predict the value of roughness required for the established cutting conditions.

Key words: Roughness, grinding, hardness, steel, AISI 1045, AISI 4140.

Modelo matemático para la predicción del acabado superficial en piezas de acero rectificadas

Resumen

El constante progreso de la industria metalmeccánica, exige cada día de métodos altamente eficaces para la obtención de productos con mejores acabados superficiales, al menor costo posible. Aunque el rectificado de piezas es considerado una operación de tipo terminal debido a las buenas condiciones de acabado superficial que se obtienen en comparación con procesos de fresado y torneado, también se hace necesario controlar los parámetros operativos para evitar valores de rugosidad perjudiciales y/o inesperados.

Basándose en este hecho se desarrolla un modelo matemático de la rugosidad R_a en función de los parámetros de corte del rectificado plano, tales como, velocidad de la pieza (V_p), profundidad de corte (d), y la dureza de los aceros AISI 1045 y 4140. El modelo potencial obtenido permite predecir un valor de rugosidad superficial para las condiciones de trabajo establecidas.

Palabras clave: Rugosidad, rectificado, dureza, acero, AISI 1045, AISI 4140.

Introducción

Las superficies mecanizadas presentan irregularidades provenientes del proceso de fabricación a las que son sometidas. Estas irregularidades tienden a formar un patrón característico de cada proceso de fabricación en toda la extensión de la superficie mecanizada.

Los estudios realizados en el proceso de rectificado han sido concentrados en su mayoría en el estudio cualitativo de fuerzas de corte, esfuerzos residuales y gradientes de temperatura 1. Pocos investigadores, se han dedicado a la búsqueda de modelos matemáticos para determinar los valores de rugosidad obtenidos después del rectificado de las piezas.

Existen diferentes métodos para producir superficies por rectificado, ya sea cilíndrico externo e interno o rectificado plano, teniendo cada uno sus propias características particulares. Estas diferencias se deben principalmente a la velocidad de trabajo y longitud de corte las cuales influyen directamente en la formación de la viruta [2].

Cuando se realiza un proceso de mecanizado a alguna pieza, existen ciertos factores que controlan la calidad y el acabado superficial obtenido; estos factores son: velocidad de la pieza, velocidad de la muela, profundidad de corte, tamaño del grano, refrigerante, etc.

Con respecto a la influencia de las variables de corte (velocidad de la pieza, profundidad de corte y velocidad de la muela), las investigaciones realizadas por Mayne y Malkin [3] y Malkin [4] han demostrado que cuando la velocidad de la pieza de trabajo aumenta, el acabado superficial es rugoso. Además, el acabado superficial depende de factores geométricos que toman lugar al comienzo del corte para una topografía de muela dada, considerándolos como puntas de corte individuales en la superficie de la muela, por lo tanto el acabado superficial depende únicamente de la relación existente entre la velocidad de la pieza de trabajo (v) y la velocidad de la muela (V); es decir, v/V y no de la profundidad de corte, ya que ésta es mayor que la altura de la geometría final obtenida en la superficie rectificada.

Investigaciones realizadas por Kannappan y Malkin [5] con una velocidad de la muela constante sugieren que el acabado superficial en una pieza rectificada será rugosa a altas velocidades de la pieza e independiente de la profundidad de corte empleada, aunque investigaciones realizadas por Farmer y Brecker [6] indican que altos valores de profundidad de corte provocan un acabado rugoso, aunque no es tan significativo en comparación con los valores de rugosidad obtenidos cuando aumenta la velocidad de la pieza. De cualquier modo, en estos experimentos los valores de profundidad de corte utilizados se encuentran entre 0.005 mm y 0.01 mm, los cuales son más pequeños que los valores utilizados comúnmente en la práctica.

Loxhan y Purcell [7] demuestran la influencia de la profundidad de corte y la velocidad

transversal de la mesa de trabajo, entre otras variables, en el acabado superficial, encontrando que se obtienen mejores acabados superficiales y menores esfuerzos residuales en piezas rectificadas a bajas profundidades de corte y altas velocidades transversales de la pieza.

En referencia a investigaciones para la obtención de modelos matemáticos, Pandit y Sathayanayan [8] obtiene un modelo matemático para un tamaño de grano de la muela característico y condiciones de elasticidad, tanto de la muela como de la pieza, donde se destaca la superposición de ondas obtenidas en la pieza durante el proceso; obteniendo el valor **rms** de la superficie a través del análisis de las marcas dejadas en la superficie de la muestra después de rectificada.

Cassier, *et al.* [9, 10] obtiene expresiones de rugosidad en función de los parámetros de corte del rectificado en piezas de acero cilíndricas, para diferentes niveles de dureza de muelas.

Younis [11] introduce una ecuación que permite predecir los valores de rugosidad dependiendo de un coeficiente de rectificado, tasa de material removido, velocidad de la pieza, velocidad de la herramienta.

Ghosh [12], estudió la superficie generada durante el proceso de rectificado, donde obtiene expresiones matemáticas donde se involucran los efectos de desgaste de la muela, variaciones en los ángulos de aristas de los granos, vibraciones de máquina y otros fenómenos físicos que tienen lugar durante el proceso, estableciendo sistemas altamente complejos.

Con el desarrollo de la presente investigación se pretende dar un nuevo aporte en el estudio del acabado superficial, específicamente en piezas de acero rectificadas, obteniéndose un modelo matemático de rugosidad de fácil aplicabilidad como función de los principales parámetros de corte y de las propiedades mecánicas del material de trabajo.

A diferencia de modelos matemáticos reflejados en investigaciones previas [8], con el presente trabajo se pretende predecir el valor de rugosidad en función de los parámetros o variables de fácil cuantificación y de sencillo control, tal como es el caso de las variables señaladas anteriormente. Las mediciones de rugosidad se realizaron utilizando el parámetro R_a , ya que éste se

emplea en la evaluación de superficies donde el acabado presenta surcos de maquinado bien orientados.

Procedimiento Experimental

Selección del material de trabajo

Los materiales seleccionados para realizar las experiencias fueron los aceros AISI 1045 Y 4140 ya que cumplían con las siguientes características:

- Propiedades mecánicas modificables con los tratamientos térmicos.
- Posibilidad de ser rectificadas con un mismo tipo de muela esmeril.
- Propiedades magnéticas que garantizan la correcta fijación de la probeta a la mesa magnética de la rectificadora plana, minimizando así efectos causados por vibración que pudiesen alterar el acabado superficial.

Fabricación de las probetas

Se cortaron muestras de 7 mm. de espesor a partir de barras de acero AISI 1045 y 4140 de diámetros 25,4 mm. Las composiciones químicas de dichos aceros se muestran en la Tabla 1.

Las características geométricas y dimensionales de las muestras están condicionadas a factores tales como:

- El diámetro de 25,4 mm asegura la completa cobertura de la superficie de la muestra con la muela disco esmeril evitando así variaciones localizadas de rugosidad, originadas por el solapamiento de pasadas en el caso de ser la pieza de mayor dimensión que la muela esmeril.
- Espesor mínimo para evitar el pandeo causado por esfuerzos residuales superficiales inducidos por el rectificado una vez retirada la muestra del electroimán, evitándose posibles distorsiones en los valores reales de

rugosidad en el momento de realizar la medición.

Tratamiento térmico

Se realizaron tratamientos térmicos de temple a partir de 850°C, en agua para el acero AISI 1045 y en aceite para el acero AISI 4140 y posteriores tratamientos de revenido a 300, 450 y 600°C por un lapso de 15 minutos para alcanzar los diferentes valores de dureza mostrados en la Tabla 2.

Rectificado de las probetas

Todas las experiencias se realizaron con una rectificadora plana marca Grand Rapids, modelo 480, con una muela esmeril marca Bay State Abrasives, tipo 502070 8A46H8 V22 (recomendada para aceros de dureza media y alta, por ser de óxido de aluminio, con tamaño de grano, grado de dureza y estructura media, y con un aglutinante vitrificado). Al realizar cada prueba la muela esmeril fue rectificada con una punta de diamante garantizando así una superficie de corte plana y con granos afilados, despreciándose el efecto de la variación de diámetros en la velocidad de corte de la muela.

Se consideraron los valores de los parámetros de corte estipulados en la Tabla 3.

Al realizar la combinación de todos los parámetros seleccionados se obtuvo un total de 27 experiencias para cada acero, éstas fueron realizadas por triplicado para garantizar la confiabilidad en el comportamiento obtenido, de esta forma se realizaron un total global de 162 experiencias.

Una vez rectificado el material, cada muestra fue colocada en un banco de mediciones para la medición de la rugosidad (**Ra**) con el rugosímetro marca Mitutoyo, modelo 211 con apreciación de 0,01 μm . Se utilizó un valor de longitud de recorrido "cutoff" de 0,25 mm de tal forma de filtrar posibles ondulaciones en la superficie de la muestra que pudiesen alterar el valor real de rugosidad.

Tabla 1
Composición química de los aceros AISI 1045 y 4140 empleados

Acero	% C \pm 0,001	% Mn \pm 0,01	% Cr \pm 0,01	%Mo \pm 0,01
1045	0,455	0,82	-	-
4140	0,425	0,89	0,85	0,15

Se realizaron seis (6) mediciones para cada experiencia descartando los valores extremos.

Posteriormente se utilizó el método de regresión lineal múltiple para la obtención del modelo matemático de la rugosidad, como función de los parámetros de corte y de las durezas de los materiales ensayados.

Tabla 2

Valores de dureza Brinell para los aceros AISI 1045 y 4140 empleados

Temperatura de revenido (°C)	HBN* AISI 1045	HBN* AISI 4140
300	421	443
450	301	381
600	243	353

*HBN Diámetro de indentador de 10 mm y carga de 3000 Kg.

Resultados y Discusión

Una vez determinada la rugosidad experimental, al realizar las pruebas con la combinación de todas las variables independientes indicadas, se obtuvo los resultados siguientes:

Analizando la Figura 1, Rugosidad vs. Dureza de los materiales ensayados, se puede ob-

Tabla 3

Parámetros de corte para el rectificado

Vm (m/min)	Vp (m/min)	d (mm)	f (mm)
1814	7,29	0,005	
	13,22	0,010	0,5
	26,67	0,015	

Vm: Velocidad de la mesa. Vp: Velocidad de la pieza. d. Profundidad de corte. f: Avance.

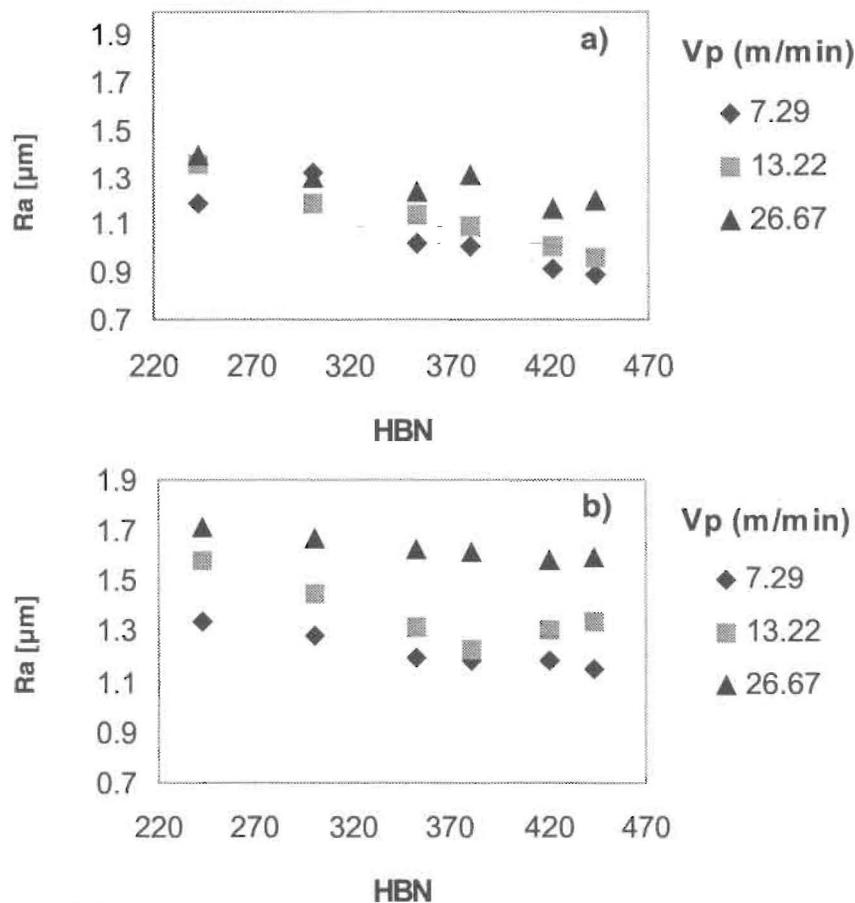


Figura 1. Rugosidad vs. Dureza Brinell de los aceros ensayados, para una velocidad de la muela constante de 1814 m/min, diferentes velocidades de la pieza y profundidad de corte, a) d=0.005 mm y b) d=0.015 mm.

servar, tal como era de esperarse que a medida que aumenta la dureza de la pieza de trabajo la rugosidad disminuye para una profundidad de corte y velocidad de la pieza constante. Este comportamiento se mantuvo constante para todas las experiencias realizadas y puede relacionarse con un aumento de la fuerza de corte que actúa sobre los granos activos de la muela esmeril, facilitándose el proceso de autoafilado de la misma, obteniendo superficies con buenos acabados al tener granos abrasivos afilados.

Respecto a la influencia de la velocidad de la pieza en la rugosidad (Figura 1), se puede observar, como era de esperarse, como se deteriora la rugosidad (altos valores de rugosidad) al aumentar la velocidad de la pieza para una velocidad de la muela y profundidad de corte constante; esto puede ser atribuido a que al aumentar la velocidad de la pieza, disminuye la fuerza de corte, pro-

vocando que el grano abrasivo no se desprenda de la muela sino que pierda su filo, provocando la remoción de viruta por un proceso de arrastre que genera un acabado superficial basto.

Analizando la Figura 2, Rugosidad vs. Dureza Brinell, para diferentes profundidades de corte y una velocidad de la pieza y de la muela constante, también como era de esperarse, el acabado superficial mejora a medida que disminuye la profundidad de corte. Este comportamiento puede ser atribuido a que al aumentar la profundidad de corte existe un aumento de la sección transversal de la viruta y en consecuencia mayor deformación del material mecanizado, provocando un acabado superficial basto.

A partir de estos resultados, los cuales se relacionan con investigaciones realizadas previamente [9, 10] y mediante la utilización del método de regresión lineal múltiple, Kazmier [13], con el

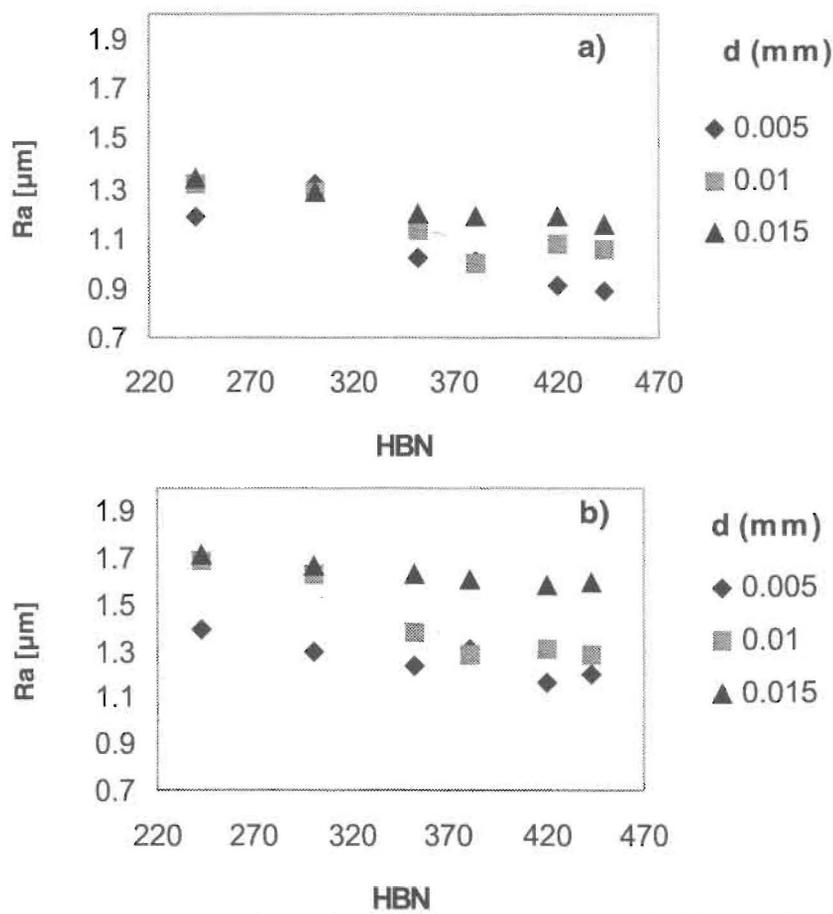


Figura 2. Rugosidad vs. Dureza de los materiales ensayados, para diferentes profundidades de corte, velocidad de la muela constante de 1814 m/min y velocidad de la pieza, a) $V_p = 7.29 \text{ m/min}$ y b) $V_p = 26.67 \text{ m/min}$.

software Sigma Plot[®], se analizó la relación de rugosidad y las variables de corte, obteniendo un modelo matemático de la rugosidad en función de las variables de corte para una velocidad de la muela constante de 1814 m/min, el cual se expresa como:

$$Ra = 14,3 V_p^{0.183} d^{0.185} HBN^{-0.347} \quad (1)$$

donde:

	Los coeficientes obtenidos son:
Ra: Rugosidad [μm].	R: 0.92
Vp: Velocidad de la pieza [m/min].	R ² : 0.89
d: Profundidad de corte [mm].	R ² _{ajustado} : 0.89
HBN: Dureza Brinell de la pieza de trabajo.	

Del modelo matemático definido por la ec. 1, se puede observar que el coeficiente de correlación múltiple (R) es alto al igual que los coeficientes de determinación (R²) y el coeficiente de determinación ajustado (R²_{ajustado}), indicando una alta dependencia de la rugosidad con las variables estudiadas. Al analizar los exponentes de cada una de las variables, se puede observar que el orden de influencia de cada variable en la rugosidad es en primer lugar la dureza del material de trabajo, luego con un comportamiento similar la velocidad de la pieza y la profundidad de corte.

Conclusiones

Para los aceros evaluados y considerando los rangos de las variables establecidas, el mejor modelo matemático obtenido para la predicción del acabado superficial en función de los parámetros de corte: velocidad de la pieza, profundidad de corte y dureza Brinell del material de trabajo, es el señalado en la ecuación 1.

Se logró reiterar los comportamientos donde se establece una mejora del acabado superficial con un aumento en la dureza del material de trabajo y una disminución de la velocidad de la pieza.

De igual forma, los resultados obtenidos evidencian una mejora del acabado superficial al disminuir la profundidad de corte para un rango de profundidad de corte entre 0,005 y 0,015 mm.

Dentro de los rangos y tipos de variables independientes utilizados, se observó que aparentemente, la variable que tiene mayor influencia en el acabado superficial es la dureza del material.

Referencias Bibliográficas

1. Dickinson, G. "Effects of Machining on Ultra High Strength Steels". Proceedings of the Institute of Mechanical Engineer. (1968), Vol 182, 3K, 148-152.
2. Farmer, A; Nakayama, et al. "Study of the Finish Produced on the surface Grinding, Part 1 Experimental and Part 2 Analytical". Proceedings of the Institute of Mechanical Engineer. (1968), Vol 182, 3K, 171-194.
3. Mayne y Malkin, S. "Parameter Optimization of the Steel Grinding Process", Journal of Engineer for Industry. (Trans ASME). (1976), Vol. 98. N 3, 1048-1052
4. Malkin, S., "Selection of Operating Parameters in Surface Grinding of Steels", Journal of Engineer for Industry. (Trans ASME), (1976), Vol. 98, N1, 56-62.
5. Kannappan, S. y Malkin, S. "Effects of Grain Size and Operating Parameters in the Mechanics of Grinding", Journal of Engineer for Industry. (Trans ASME), (1972), Vol. 94, 833-842.
6. Farmer, P. A., Brecker, J.N. y Shau, M. "Study of the Finish Produced in Surface Grinding, Part I: Experimental", Proceedings of the Institute of Mechanical Engineer., (1968), Vol. 182, 31 C, 171.
7. Loxham, J. and Percell, J. "Measurement and Control of the Residual Stress Produced by Grinding Operations". Proceedings of the Institute of Mechanical Engineer., (1968), Vol. 182, 3K, 205-215.
8. Pandit, S., M. y Sathyanarayanan, G. "A Model for Surface Grinding Based on Abrasive Geometry and Elasticity", Journal of Engineer for Industry. (Trans ASME), (1982), Vol 104, 349-357.
9. Cassier, Z; Alvarado, A; Assal, A. "Influencia de los Parámetros de corte y de las Características de la Muela en el Acabado Superficial de Piezas Cilíndricas Rectificadas".

- V Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Año 4, No. 1, España, 1986, 41-45
10. Cassier, Z. "Efecto de los Parámetros de Corte Sobre el Acabado Superficial en el Rectificado de Piezas de Acero Cilíndricas". VI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Año 4, No. 1, España, (1987), 131-134
11. Younis, M. "An Equivalent Chip Coefficient Towards an Adaptive Controlled Grinding Process". Proceedings of the Institute of Mechanical Engineer., (1990), Vol. 204, 61-70.
12. Ghosh, S. "Modelling and Analysis of the Grinding Process". Thesis report Master's Degree Institute for System Research, USA, (1993).
- Kazmier L. "Estadística Aplicada a Administración y Economía". Mc Graw-Hill. U.S.A. 2da Edición, (1991), 277 - 312.

Recibido el 2 de Febrero de 1998

En forma revisada el 3 de Mayo de 1999