

Efecto de los Parámetros de Corte sobre la Rugosidad en Torneado en Seco de Acero AISI 1018.

Effect of the Cutting Parameters on the
Roughness in Dry Turning of AISI 1018 Steel.

Isaí Espinoza Torres^a
Israel Martínez Ramírez^b
Juan Manuel Soria Flores^c
Saúl Hernández Moreno^d
Felipe de Jesús Torres del Carmen^e

a Universidad de Guanajuato,
i.espinozatorres@ugto.mx

b Universidad de Guanajuato,
israel.martinez@ugto.mx

c Universidad de Guanajuato, jm.soriaflores@ugto.mx

d Universidad de Guanajuato,
sa.hernandezmoreno@ugto.mx

e Universidad de Guanajuato, fdj.torres@ugto.mx

Resumen—El acero AISI 1018 se utiliza en la fabricación de maquinaria y en la construcción mecánica de estructuras. Debido a su buen grado de maquinabilidad se ha utilizado en ejes eslabones, anclas para cimentaciones, pasadores, tornillería y herramientas para la agricultura. En el presente trabajo se desarrolló y analizó un diseño de experimentos del tipo factorial 2k para evaluar el efecto de la velocidad de corte (200 y 150 [m/min]), avance (0.1 y 0.05 [mm/rev]) y profundidad de corte (1 y 0.5 [mm]). La rugosidad media cuadrática en torneado en seco sobre una barra de acero AISI 1018 fue medida. Se programó un código G para maquinar las pruebas en un torno CNC EMCO, considerando las combinaciones de los parámetros de corte y la aleatoriedad del experimento se midió la rugosidad superficial. Finalmente, se realizó un programa en el software Matlab para resolver en forma general el diseño de experimentos 2k y obtener e interpretar los efectos de los factores en el experimento. Gráficas de contorno y superficie son mostradas. Los resultados obtenidos demuestran que el único factor que afecta significativamente la respuesta de la rugosidad es el avance. Se concluyó que a menor avance se obtiene un mejor acabado superficial.

Palabras clave— Diseño de experimentos, efecto, factores, rugosidad.

Abstract— AISI 1018 steel is used in the manufacture of machinery and in the mechanical construction of structures. Due to its good degree of machinability, it has been used in link axles, anchors for foundations, pins, screws, and tools for agriculture. In the present work, a 2k factorial design of experiments was developed and analyzed to evaluate the effect of cutting speed (200 and 150 [m/min]), feed (0.1 and 0.05 [mm/rev]) and cutting depth (1 and 0.5 [mm]). The root means square roughness in dry turning on an AISI 1018 steel bar was measured.

A G-code was programmed to machine the tests on an EMCO CNC lathe, considering the combinations of the cutting parameters and the randomness of the experiment, the surface roughness was measured. Finally, a program was made in the MATLAB software to generally solve the 2k design of experiments and obtain the effects. Contour and surface plots are showed. The results obtained show that the only factor that significantly affects the roughness response is the feed. It was concluded that the less progress a better surface finish is obtained.

Keywords— Design of experiments, effect, factors, roughness.

I. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas de una pieza que es maquinada pueden verse afectadas por diferentes variables. Una de estas variables es la rugosidad, que son las irregularidades que posee una superficie. Debido a lo anterior, es importante encontrar métodos prácticos y efectivos que permitan determinar el valor de la rugosidad deseada en el acabado superficial de la pieza mecanizada, con la finalidad de minimizar costos y tiempo de fabricación, ya que algunos de los métodos utilizados para la optimización de la rugosidad aumentan el tiempo de fabricación de la pieza y tienen costos elevados.

En la actualidad se busca que las piezas fabricadas tengan el mejor acabado posible. Todas las superficies de las piezas que son maquinadas, por más perfecto que sea el maquinado, presentan detalles o marcas que deja el proceso empleado para su fabricación. Algunos de estos procesos son torneado, fresado, rectificado, bruñido, planeado, entre otros.

(Yang & Tarn) realizaron uno de los primeros análisis de superficies, mediante el método de Taguchi analizó los parámetros de corte comunes en un proceso de mecanizado a un material de acero S45C usando una herramienta de corte de carburo de tungsteno. Su análisis fue enfocado principalmente en velocidad de corte, velocidad de avance y profundidad. Lo anterior teniendo en cuenta que lo primordial para él, era el

desempeño óptimo de la herramienta, la vida útil y la obtención de la mejor superficie de la pieza mecanizada. Debido a lo anterior, menciona en su investigación que uno de los parámetros más importantes es la geometría de la herramienta, en este caso el radio de curvatura en la punta de esta, ya que previene marcas profundas en el material.

(Korkut, Kasap, Ciftci, & Seker, 2004) determinaron los parámetros óptimos de corte durante el maquinado de un acero inoxidable AISI 304, utilizó diferentes velocidades de corte (120, 150 y 180 [m/min]) y avances (0.24 y 2.5 [mm/rev]) y concluyó que a mayor velocidad de corte se obtiene un mejor acabado superficial.

(Ciftci, 2006) realizó experimentos en torneado en seco sobre acero inoxidable AISI 304 y AISI 316, utilizó insertos de carburo de tungsteno cementado con revestimiento de múltiples capas. Los experimentos se realizaron a varias velocidades de corte (120, 150, 180 y 210 [m/min]) mientras que el avance (0.16 [mm/rev]) y la profundidad de corte (1 [mm]) se mantuvieron constantes. El autor concluyó que la velocidad de corte tiene un significativo efecto sobre los valores de rugosidad en superficie maquinada ya que mientras la velocidad de corte aumenta los valores de la rugosidad superficial disminuyen, valores altos en la rugosidad son contribuidos a la alta tendencia de formación de BUE debido a las propiedades del material de trabajo.

(Equbal, y otros, 2022) investigaron el desempeño del fresado CNC en acero inoxidable AISI 316 utilizando insertos de carburo de tungsteno como herramienta de corte. Los parámetros de mecanizado de entrada escogidos fueron la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte, cada uno en tres niveles. El diseño central del experimento se basó en la metodología de superficie de respuesta. Los autores analizaron los resultados de los experimentos con análisis de varianza, gráficos de respuesta y gráficos de superficie tridimensional. Concluyeron que los parámetros de corte óptimos fueron: velocidad de corte de 220 m/min, un avance de 0.20 mm/rev y profundidad de corte de 1.2 mm. El estudio reveló que la rugosidad se ve afectada predominantemente por la velocidad de corte.

(Vishwas, y otros, 2018) estudió el efecto de los parámetros de maquinado sobre el acabado superficial en piezas cilíndricas empleando un proceso de torneado en seco. Los autores utilizaron inoxidable AISI 410 para realizar los experimentos. Analizaron los efectos que tienen los parámetros de corte (avance, velocidad de corte y profundidad de corte) en el acabado superficial. Implementaron el método de Taguchi y concluyeron que la rugosidad superficial decrece conforme incrementa la velocidad de corte. Los parámetros de corte óptimos según el estudio fue una velocidad de corte de 48 m/min, un avance de 0.143 mm/rev y una profundidad de corte de 0.6 mm.

Por otro lado, (Olsen) realizó pruebas de mecanizado en material de acero AISI-SAE 1045, demostrando por medio de ecuaciones exponenciales, la relación que tienen los parámetros de velocidad de corte y el avance con la rugosidad superficial. En su trabajo, Olsen analizó que, por medio de una combinación de parámetros de mecanizado, se puede lograr una configuración óptima para que el corte de la herramienta otorgue en el material una rugosidad superficial mínima. Cada prueba que realizó fue basada en el método de matriz ortogonal de Taguchi y en el análisis de varianza ANOVA, este último con el fin de encontrar 12 factores significativos y contribuciones individuales en función de la superficie esperada.

A su vez, (Bernardos & Vosniakos) muestran los resultados de un modelo para la predicción de la rugosidad superficial en operaciones de fresado empleando redes neuronales y el método Taguchi donde el avance por diente del cortador, el fluido para corte, la profundidad y la herramienta de corte son los factores que más afectan la rugosidad superficial de la pieza de trabajo.

De acuerdo con (Cassier, Muñoz, Castellanos, & Payares) es indispensable el estudio de la rugosidad superficial de cualquier elemento mecanizado que vaya a ser empleado en la industria, ya que factores como la calidad, confiabilidad y desempeño en el servicio requerido de un

componente mecanizado dependen significativamente del acabado superficial resultante del proceso de fabricación. La optimización de las condiciones de mecanizado es necesaria para obtener piezas de la mejor calidad al menor costo de producción. En el presente trabajo se analizaron los efectos de la velocidad de corte, avance y profundidad de corte sobre la rugosidad media, y se muestra la influencia de estos parámetros de corte sobre la rugosidad del material.

II. METODOLOGÍA

1) Identificación y exposición del problema

El acabado superficial de un componente que fue maquinado es importante ya que factores como la calidad, confiabilidad y desempeño, dependen significativamente de éste y la optimización de las condiciones de mecanizado es necesaria para obtener piezas de la mejor calidad al menor costo de producción. Debido a lo anterior, se analizan los efectos de los factores: velocidad de corte, avance y profundidad de corte en la rugosidad superficial media cuadrática de una barra de acero AISI 1018 maquinada en un torno CNC.

2) Elección de los factores niveles y rangos

Se eligió utilizar dos niveles para cada factor considerado, es decir, un nivel alto y un nivel bajo. Así mismo, se optó

por analizar los factores: velocidad de corte, avance y profundidad de corte. En la Tabla 1 se muestra el valor de los niveles de cada factor a analizar.

Tabla 1. Valor de los niveles de cada factor.

Factor	Nivel alto	Nivel bajo
A Velocidad de corte (V_c , m/min)	200	150
B Avance (f , mm/rev)	0,1	0,05
C Profundidad de corte (t , mm)	1	0,5

Fuente: Autor

3) Selección de la variable de respuesta

Existen diferentes sistemas de medición para la rugosidad superficial. Para este experimento, se utilizó el sistema M, también conocido como sistema de la línea media. La línea media se define como la línea localizada en la parte media del perfil de rugosidad, con la misma forma que el perfil geométrico, dispuesta paralela a la dirección general del perfil, dentro de los límites comprendidos como base de medición, de modo que la suma de las áreas por encima de ella sean exactamente iguales a la suma de las áreas que están por debajo. Los parámetros de medición de rugosidad basados en la línea media son agrupados en tres clases: los que se basan en la medida de la profundidad de la rugosidad, los que se basan en medidas horizontales y los que se basan en medidas proporcionales. Se consideró analizar a los sistemas basados en la profundidad de la rugosidad, que, a su vez, de acuerdo con Grupo Tecnología Mecánica se clasifican como se enlista a continuación:

- Rugosidad media aritmética R_a .
- Rugosidad media cuadrática R_q .
- Rugosidad parcial Z .
- Rugosidad media R_z .
- Rugosidad máxima R_{max} .
- Profundidad total de la rugosidad R_t .

Se seleccionó a la rugosidad media cuadrática R_q como lo variable de respuesta. Lo anterior debido a la importancia de este parámetro, ya que se emplea en diversas situaciones. Por ejemplo, para analizar superficies donde el acabado presenta los surcos bien orientados [5] (torneado, fresado, etc.) y también para analizar superficies donde la rugosidad media aritmética presenta poca resolución. Algunas de las ventajas del parámetro R_q son: comparado con R_a este parámetro tiene el efecto de dar peso extra para altos valores (cerca del 11% mayor que R_a , diferencia que pasa a ser importante en muchos casos) y para superficies donde la detección de picos o valles se torna importante, evidenciándolos más que con R_a , pues acentúa el error al elevarlo al cuadrado.

4) Elección del diseño experimental

Debido a que en el presente experimento se incluyen varios factores y se desea analizar el efecto de los mismos sobre la respuesta, que es la rugosidad, se optó por utilizar el diseño de experimentos del tipo factorial 2^k .

De acuerdo con Montgomery (2013) algunas consideraciones importantes

que se toman en cuenta para utilizar este diseño de experimentos son:

- Los factores son fijos.
- Los diseños son completamente aleatorizados.
- Se satisfacen los supuestos de normalidad.

5) Realización del experimento

Primero se adecuó la barra para poderla maquinar, se realizó un corte en una barra de material AISI 1018 de $1\frac{1}{8}$ in de diámetro, para establecer su longitud de 206 mm.

Una vez cortada la barra, se colocó en el torno CNC para realizarle las operaciones de careado y cilindrado. Posteriormente, se ejecutó un programa de código G en el torno CNC, para maquinar la barra de acuerdo al orden obtenido de forma aleatoria para las combinaciones de los tratamientos. Este orden aleatorio se muestra en la Tabla 2 y se definió mediante un programa realizado en el software Matlab®.

El bloqueo es una técnica de diseño usada para mejorar la precisión con la cual las comparaciones entre los factores de interés son realizadas (Wiley & Sons, 2013). De acuerdo con la literatura, se realizó un bloqueo del factor radio de la herramienta, de manera constante para realizar todos los experimentos y así reducir o eliminar la variabilidad transmitida de los factores de ruido, los cuales son los factores que pueden

influenciar la respuesta experimental pero no representan un interés directo para la presente investigación. Por lo tanto, todos los maquinados en la pieza se realizaron con una herramienta de radio de 0.4 mm.

En la Fig. 1 se muestra el orden aleatorio presentado en la Tabla 2, como resultado del proceso de maquinado para obtener la primera réplica del experimento.

Posteriormente, se midió la rugosidad superficial con el rugosímetro de cada combinación de tratamientos en la barra, como se ilustra en la Fig. 2.

Una vez obtenidos los datos de la primera réplica, se realizó nuevamente un cilindrado a la barra de acero para posteriormente ejecutar otro programa de código G en el torno CNC y de esta forma maquinar nuevamente la barra de acuerdo al orden aleatorio mostrado en la Tabla 2. Lo anterior con el fin de obtener los datos de la segunda réplica.

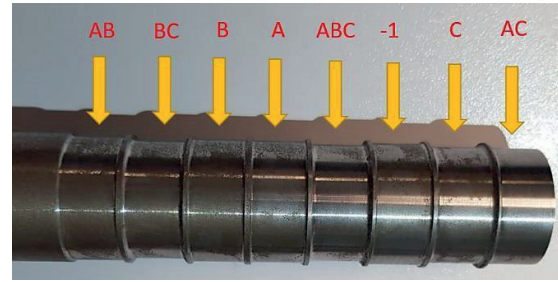
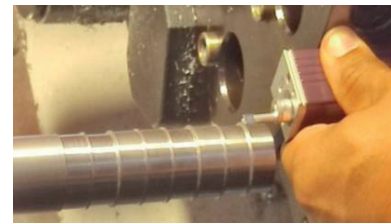


Fig. 1. Superficies maquinadas de acuerdo al orden aleatorio de los tratamientos.

Fuente: Autor del proyecto.



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Instrumento de medición de parámetros de rugosidad (rugosímetro). (b) Proceso de medición de la rugosidad superficial.

Fuente: Autor del proyecto.

Nuevamente se registraron los datos de las rugosidades obtenidas. Como ya se mencionó, se realizaron dos réplicas del experimento, y con el objetivo de realizar un experimento con resultados más confiables, para cada réplica se realizaron dos mediciones de la rugosidad, estas dos mediciones se promediaron para obtener el valor de la rugosidad correspondiente a cada combinación. Los resultados de la prueba experimental se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Orden aleatorio de los tratamientos.

Tratamiento	Prueba	Factores		
		A [$\frac{m}{min}$]	B [$\frac{mm}{rev}$]	C [mm]
ac	1	200	0.05	1
c	2	150	0.05	1
(l)	3	150	0.05	0.5
abc	4	200	0.1	1
a	5	200	0.05	0.5
b	6	150	0.1	0.5
bc	7	150	0.1	1
ab	8	200	0.1	0.5

Fuente: Autor.

Tabla 3. Resultados de la prueba experimental.

Tratamientos	Rugosidad [μm]	
	Réplica 1	Réplica 2
(1)	1.2535	1.2375
a	1.221	0.968
b	1.8685	1.6665
ab	2.1235	1.9815
c	1.193	1.1395
ac	0.8945	1.282
bc	1.932	1.8685
abc	2.0525	1.7565

III. RESULTADOS

Para el análisis estadístico de los datos se realizó un programa en el software Matlab® que realiza el análisis de varianza (ANOVA) y resuelve de forma general el diseño de experimentos del tipo factorial 2^k .

De la estimación de los efectos y de la suma de cuadrados mostrados en la Tabla 4, se puede apreciar que el efecto principal B (avance) es el que tiene más efecto en el experimento.

Por otro lado con el análisis realizado del ANOVA se encontró que el efecto del factor B es el único que es muy significativo sobre el valor de la rugosidad (que es la variable de respuesta). La gráfica de superficie de respuesta se muestra en la Fig. 3. Esta gráfica se obtuvo con la ecuación (1), que es la ecuación de regresión en función de las variables naturales significativas, pero considerando también el efecto principal de la profundidad de corte, debido a que en el análisis ANOVA es el siguiente factor principal significativo, lo anterior con el fin de poder realizar las gráficas.

Tabla 4. Estimación de los efectos de cada factor

Factor	Estimación del efecto	Suma de cuadrados
A	0.015062	0.00090752
B	0.75756	2.2956
C	-0.025187	0.0025376
AB	0.12956	0.067146
AC	-0.051937	0.01079
BC	0.017562	0.0012338
ABC	-0.088437	0.031285

Fuente: Autor.

$$\hat{y} = 0,42884375 + 15,15125 \text{ Avance} - 0,050375 \text{ ProfundidaddeCorte} \quad (1)$$

De la Fig. 3 se observa que efectivamente, el factor de la profundidad de corte no tiene un efecto significativo sobre la rugosidad. Así mismo, la respuesta de la rugosidad tiende a ser lineal y esta se ve afectada únicamente con el incremento del avance.

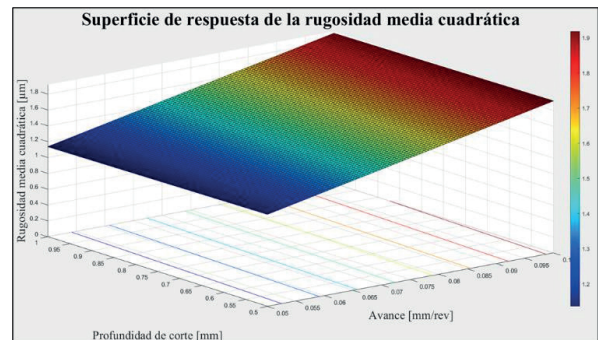


Fig. 3. Gráfica de superficie de respuesta para la rugosidad. Fuente: Autor del proyecto.
Fuente: Autor.

La gráfica de contorno de respuesta para la rugosidad se muestra en la Fig. 4, y se obtuvo al igual que la gráfica de superficie de respuesta, con la ecuación (1). En esta gráfica de contorno, se observan rectas paralelas porque el modelo de regresión contiene únicamente los efectos principales de los factores avance y profundidad de

corte, es decir, el modelo de regresión no contiene términos de interacciones. De esta gráfica, al igual que en el caso de la de superficie, se aprecia que la profundidad de corte no tiene un efecto significativo sobre la rugosidad, mientras que, para el caso del avance, si este aumenta, la rugosidad también aumenta.

En la Fig. 5 se muestra la gráfica de residuales en escala de probabilidad normal, de donde se observa que los datos de los residuales se asemejan a la tendencia de la línea recta, esto significa que los datos siguen una distribución normal y que el experimento se realizó de forma aleatoria. Analizando el comportamiento de linealidad, el análisis de residuales es aparentemente satisfactorio.

En todos los experimentos existen fuentes de error, las cuales, si bien, no se pueden eliminar, se pueden manejar de forma que afecten lo menos posible. Las fuentes de error que se detectaron en el presente experimento fueron: el posible error en la medición realizada por el experimentador, y además, uno de los principales factores de error en los experimentos en general, es la eficiencia del instrumento de medición o error de medición debido a que si el instrumento no tiene una eficiencia adecuada el experimento carecerá de sustentación.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que, en el presente experimento, el único factor que afecta significativamente la respuesta de la rugosidad es el avance. Es decir, tanto los otros factores principales (velocidad de corte y profundidad de corte), como las interacciones de los tres factores no tienen efectos significativos.

Por otro lado, si se desea que la rugosidad sea lo menor posible, se recomienda utilizar valores de avance pequeños, ya que, entre más pequeño es el avance, la rugosidad es menor. Esto se observa tanto en las gráficas de superficie y de contorno, así como en la ecuación de regresión con variables significativas.

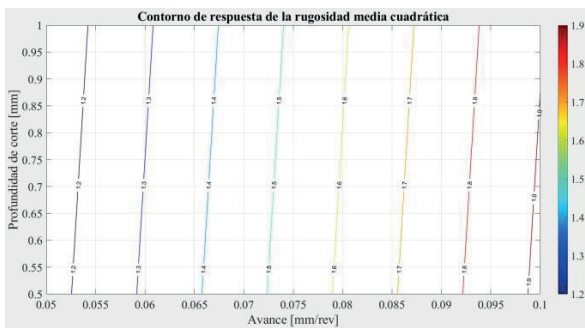


Fig. 4. Gráfica de contorno de respuesta para la rugosidad. Fuente: Autor del proyecto.

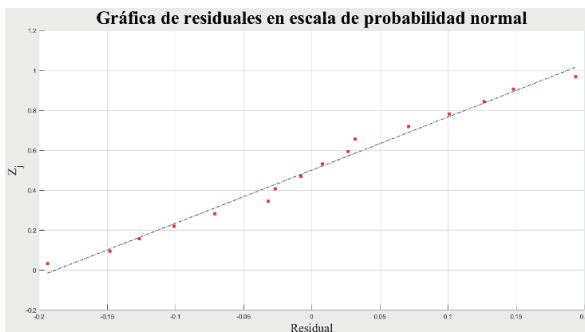


Fig. 5. Gráfica de residuales en escala de probabilidad normal. Fuente: Autor del proyecto.

V. REFERENCIAS

- [1] Bernardos, P., & Vosniakos, G. (s.f.). Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*. 833–844.
- [2] Cassier, Z., Muñoz, E., Castellanos, C., & Payares. (s.f.). Predicción del acabado superficial de piezas de acero. *Revista latinoamericana de Metalurgia y Materiales*.
- [3] Ciftci, I. (2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International*, 565-569.
- [4] Equbal, A., Equbal, M. A., Equbal, M. I., Ravindrannair, P., Khan, Z. A., Badruddin, I. A., . . . Kittur, M. I. (2022). Evaluating CNC Milling Performance for Machining AISI 316 Stainless Steel with Carbide Cutting Tool Insert. *Materials*.
- [5] Korkut, I., Kasap, M., Ciftci, I., & Seker, U. (2004). Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials and Design*, 303-305.
- [6] Grupo Tecnología Mecánica, (s.f.). *Procesos de fabricación, Rugosidad Superficial*. Obtenido de: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>
- [7] Olsen, K. F. (s.f.). Surface Roughness as a Function of Cutting Conditions when Turning Steel, Machine Tool and Production Trends, Engineering Proceedings, . *The Pennsylvania State University*, 149-160.
- [8] Vishwas, V., G. L., Naik, G. M., B, S., Roy, A., Y., P. B., & Badiger, R. (2018). Effect of Machining Parameters on Surface integrity during Dry Turning of AISI 410 martensitic stainless steel. *Materials Science and Engineering*.
- [9] Wiley, J., & Sons. (2013). *Design and Analysis of Experiments*. 8a Ed.
- [10] Yang, W., & Tarng, Y. (s.f.). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *J Mater Process Technol*. 84:122–129.