

Determinación de los factores que influyen en la rugosidad superficial en un proceso de mecanizado para el acero AISI 4140: cilindrado

Determination of factors influencing surface roughness in a machining process for AISI 4140 steel: turning

Cristian Pedraza Yepes¹, Jorge González Coneo², Lisandro Vargas H³., Jorge Reyes Carreño⁴, John López Álzate⁵

Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

ingcpedraza@hotmail.com

jgonzalez@cuc.edu.co

lvargash@gmail.com

radicación_9@hotmail.com

inghammer@hotmail.es

Resumen— En este artículo se discute el uso de algunas técnicas del diseño de experimentos (DOE), tales como el diseño factorial, la regresión lineal múltiple o la metodología de superficies de respuesta (RSM) para la minimización de la rugosidad superficial en el torneado del acero AISI 4140. Los resultados medidos fueron recolectados y analizados con ayuda del paquete de software comercial MINITAB15. Los experimentos han sido conducidos utilizando la técnica del diseño factorial 24. La matriz de condiciones experimentales incluye velocidades de corte de 65 y 80 m/min, avances de 0.055 y 0.08 mm/rev, profundidades de corte de 0.5 y 0.7 y el uso de refrigerante (unidades codificadas), 0 = Sin refrigerante, 1= Con refrigerante. Se evalúa el efecto de los parámetros de corte y se determinan las condiciones de corte óptimas para la minimización de la rugosidad superficial. Se ha establecido un modelo de primer orden entre los parámetros de corte y la rugosidad superficial utilizando la RSM.

Palabras clave— superficie, rugosidad, diseño de experimentos, acero, metodología de superficies de respuesta.

Abstract— This paper discusses the use of some Design of Experiments (DOE) techniques, such as factorial design, multiple linear regression or response surface methodology (RSM) for minimizing the surface roughness in turning of AISI 4140 steel. The measured results were then collected and analyzed with the help of the commercial software package MINITAB15. The experiments have been conducted using 24 factorial design technique. The matrix of test conditions included cutting speeds of 65 and 80 m/min, feed rates of 0.055 and 0.08 mm/rev, depth of cut of

0.5 and 0.7 and use of coolant (coded units), 0=without coolant, 1=with coolant. The effect of cutting parameters on surface roughness is evaluated and the optimum cutting condition for minimizing the surface roughness is determined. A first-order model has been established between the cutting parameters and surface roughness using RSM. The experimental results reveal that the most significant machining parameter for surface roughness is coolant followed by depth of cut.

Key Word — surface, roughness, design of experiments, steel, response surface methodology.

I. INTRODUCCIÓN

La exigencia general del mercado actual en relación a la calidad de los productos que la industria provee, junto con el desarrollo de la automatización a nivel de todos los procesos en industrias como la metalmecánica, la aeronáutica o la automotriz, y en particular en la fabricación de piezas mecánicas con operaciones de remoción de material (torneado, fresado, taladrado entre otras), ha llevado al uso de modelos que permitan ayudar a determinar las condiciones óptimas de maquinado para la obtención de un buen acabado superficial. Benardos y Vosniakos [1], presentan en 2003 un estudio en el que clasifican 4 diferentes metodologías utilizadas por los investigadores hasta el momento para la predicción de la rugosidad superficial en el mecanizado. Una de esas

¹ Ingeniero Mecánico, (C) M. Sc.

² Ingeniero Mecánico, (C) M. Sc.

³ Ingeniero Mecánico, M. Sc.

⁴ Ingeniero Industrial

⁵ Ingeniero Industrial

metodologías es el diseño de experimentos, en la cual, técnicas como el diseño factorial, la metodología de superficies de respuesta y la regresión lineal múltiple se pueden desarrollar de forma combinada.

Gracias al conocimiento derivado del análisis de los resultados obtenidos en los procesos experimentales, se logró establecer una metodología para la selección de parámetros de mecanizado, para uso en empresas dedicadas a procesar el acero estudiado. La metodología de experimentación y evaluación del acero AISI 4140 aplicada aquí, puede usarse para la evaluación de otros materiales.

II. CONTENIDO

El tema de la Rugosidad Superficial ha sido ampliamente estudiado por muchos autores, en busca de intentar predecir su comportamiento, así como definir los diferentes factores que la determinan.

En el trabajo propuesto por Davim J. [2], se establece una correlación entre la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte radial, para obtener ecuaciones para Ra y Rt (parámetros de rugosidad superficial), obtenidas por regresión lineal múltiple.

Vivancos J. y otros [3], presentan un trabajo cuyo objetivo es establecer las variables que deben ser consideradas en un modelo de rugosidad superficial en el mecanizado a alta velocidad, y para ello emplean el diseño de experimentos. Los parámetros considerados son la velocidad de corte, el avance, la profundidad de corte radial y la profundidad de corte axial.

Ghani J.A. [4], evalúa los parámetros velocidad de corte, avance y la profundidad de corte radial, para el fresado de acabado. El objetivo de los experimentos es poder optimizar los parámetros para obtener valores más bajos (mejores) de rugosidad y de fuerza de corte resultantes.

Kopac J. y Bahor M. [5], utilizan la metodología de superficies de respuesta, para el diseño y análisis de experimentos que permiten evaluar la influencia de la historia tecnológica del material de la pieza sobre la rugosidad. Evalúan la velocidad de corte, el avance y el radio de la herramienta.

De forma general los parámetros de corte velocidad de corte, avance y profundidad de corte, son considerados como los factores más relevantes a considerar en los modelos de predicción de la rugosidad superficial.

EL ACERO Y SUS GENERALIDADES

El Acero es una aleación de hierro que contiene entre 0.02 y 2.11% de carbono en peso. Frecuentemente se incluyen otros elementos aleantes como: Manganeso,

Cromo, Níquel y Molibdeno, pero el contenido de carbono es el convierte el hierro en acero. Los hay 1) Aceros al carbono, 2) Aceros de baja aleación, 3) Aceros inoxidables o de alta aleación y 4) Aceros de herramienta [6].

El acero AISI 4140 es un acero de baja aleación, el cual es ampliamente utilizado para la construcción de plantas químicas, turbinas de vapor y calderas. También es utilizado en la industria automovilística y petrolera. Esto se debe a su alta resistencia a la torsión y presión, a su buen manejo a temperaturas entre los 150°C y 300°C y a su bajo costo en comparación con otros aceros.

En específico, el acero AISI 4140 es utilizado para fabricación de partes mecánicas tales como [7]:

- Ejes, engranajes, cigüeñales, cilindros de motores, anillos para rodamientos comerciales, bielas, rotores, piñones, coronas dentadas, vástagos, pines émbolos, árboles de transmisión, tuercas, tornillos, pernos y espárragos.
- Cañones de armas para cacería.
- Partes estructurales de aviones.
- Varillas roscadas para la industria petrolera.
- Herramientas forjadas como: llaves de mano, destornilladores, entre otros

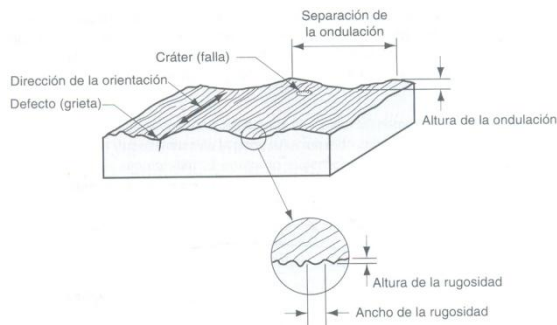
LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL

La rugosidad superficial es un índice muy utilizado en la calidad del producto y como requerimiento técnico en los productos mecánicos. Lograr la rugosidad deseada es de gran importancia para el comportamiento de una pieza.

La Topografía Superficial, que según la norma ASME B46.1, es “la representación tridimensional de las irregularidades geométricas de las superficies”, está descrita, en función de sus características espaciales, por las siguientes componentes (ver fig. 1) [8]:

- De longitud de onda corta: Rugosidad (*Roughness*).
- De onda media: Ondulación (*Waviness*).
- De onda larga: Errores de forma (*Form*).

Figura-1. Formas de la textura superficial



Existen diversos parámetros para definir la rugosidad superficial de un material; hasta la fecha se han identificado alrededor de unos 150. Uno de los más utilizados debido a su practicidad es Ra.

Ra es una media aritmética (MA) basada en los valores absolutos de la desviación, y a este valor de la rugosidad se le denomina *rugosidad promedio*. En forma de ecuación.

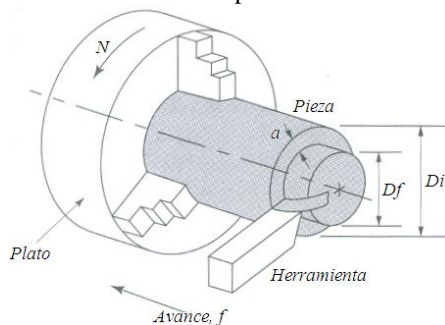
$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx$$

Donde y = desviación vertical con respecto a la superficie nominal pulg (m) y L_m = Distancia especificada sobre la cual se miden las desviaciones [9].

TORNEADO

El torneado es un proceso en el que la parte de trabajo está girando mientras se maquina. El material inicial suele ser una pieza fabricada por otros procesos como fundición, forjado, extrusión o estirado. Dentro del torneado existen múltiples operaciones de corte, tales como: torneado cónico, refrentado, perfilado, tronzado, roscado, moleteado y la más simple de todas el *cilindrado*, entre otras [6].

Figura-2. Variables en una operación de cilindrado



DISEÑO EXPERIMENTAL

Un experimento puede definirse como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada (*factores*) de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida (*variable de respuesta*). El Diseño de Experimentos, también conocido como Diseño

Experimental o DOE (por las siglas en inglés, *Design Of Experiments*) es una metodología estadística destinada a la planificación y análisis de un experimento; Los tres principios básicos del diseño experimental son la realización de *réplicas*, la *aleatorización* y la formación de *bloques* [10].

Robert O. Kuehl [11] define al Diseño Factorial como un diseño experimental en la cual se realizan todas las combinaciones posibles de los *niveles* de varios factores. Con frecuencia, los experimentos con diseños factoriales se conocen como factoriales o experimentos factoriales.

El más importante de los casos de diseño factorial es el de K factores, cada uno con solo dos niveles. Estos niveles pueden ser cualitativos como dos valores de temperatura, presión o tiempo, o bien cualitativos, como dos máquinas, dos operadores, los niveles “alto” y “bajo” de un factor, o quizá la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de este diseño requiere de $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se le llama *diseño factorial* 2^k .

MATERIALES Y METODO

Se adquirieron 24 barras de acero bonificado AISI 4140 bajo las condiciones normales de suministro industrial, para las 3 replicas de un diseño 2^4 . Las barras fueron provistas por la empresa BÖHLER ANDINA. Las dimensiones iniciales de cada barra fueron en promedio de 25,4 mm de diámetro por 120 mm de largo.

Figura-3. Barras de acero AISI 4140



Tabla-1. Composición química nominal del acero AISI 4140

ELEMENTOS	C	Si	Mn	Cr	Mo
Porcentaje en peso	0.38-0.43	0.15-0.35	0.75-1.00	0.80-1.10	0.15-0.25

La operación de mecanizado seleccionada fue el cilindrado. Las probetas se cilindraron en un torno CNC marca FANUC serie T-5, con un inserto de carburo con triple recubrimiento mediante deposición química de vapor a temperatura intermedia (MTCVD).

Tabla-2. Detalles de la herramienta de corte.

Portaherramientas	MCLNR 1616 H12
Geometría de herramienta	Angulo ataque: 5° Radio inserto: 0.8 Angulo incidencia: 0°
Especificación inserto	CNMG432-M3/ANSI CNMG120408/ISO
Recubrimientos	TiN, Al ₂ O ₃ , TiCN

Cada barra se sujetó a un mandril de tres mordazas autocentrantes. La distancia sujeta de cada barra fue de 60 mm (aproximadamente media longitud de cada barra). No se utilizó contrapunto; a cada barra se le practicó un cilindrado una distancia de 25 mm a lado y lado a fin de alcanzar las 48 corridas requeridas para el experimento 2⁴ con 3 réplicas. Las 48 corridas se realizaron aleatorizadas para dos bloques (maquinado sin refrigerante y con refrigerante).



RESULTADOS Y DISCUSIONES

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el paquete MINITAB15. Aquí se generó el diseño factorial aleatorizado, y se introdujeron las mediciones obtenidas de R_a .

Los resultados experimentales se resumen en la Tabla 3, la cual muestra las diferentes combinaciones de los factores y sus niveles, así como las réplicas en cada corrida y el orden de estas.

Figura-4. Operación de cilindrado del acero AISI 4140

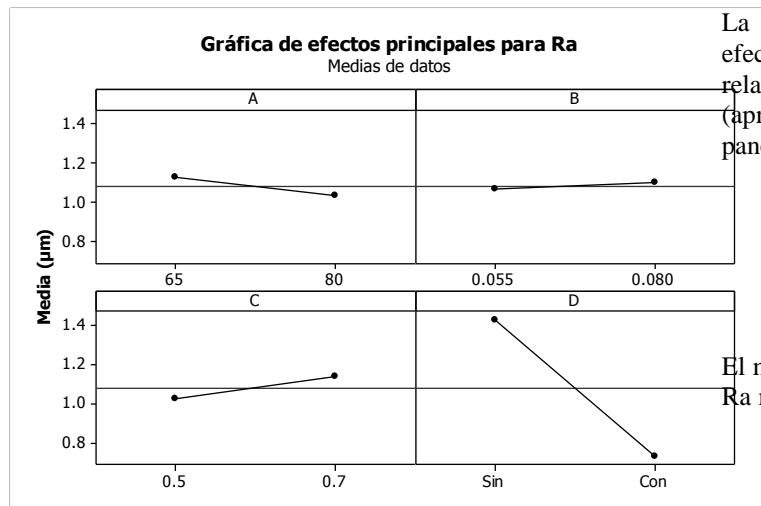


Las mediciones para la rugosidad superficial se realizaron con un rugosímetro marca MAHR FEDERAL modelo POCKET SURF III.

Figura-5. Rugosímetro y probeta

Tabla-3. Resultados experimentales para las diferentes combinaciones de factores; los datos de los factores con base en el manual del fabricante de insertos SANDVIK

Factores				Respuesta
A	B	C	D	
v	f	a	Ref	Ra
-	-	-	-	1.623
-	-	-	+	0.728
-	-	+	-	1.482
-	-	+	+	0.828
-	+	-	-	1.337
-	+	-	+	0.692
-	+	+	-	1.470
-	+	+	+	0.851
+	-	-	-	0.931
+	-	-	+	0.553
+	-	+	-	1.676
+	-	+	+	0.662
+	+	-	-	1.648
+	+	-	+	0.662
+	+	+	-	1.238
+	+	+	+	0.870



La gráfica de efectos principales permite visualizar el efecto de los factores en la respuesta y comparar la fuerza relativa de los efectos. La media general (aproximadamente 1.08) se graficó a través de cada panel.

- La velocidad de corte alta produjo un Ra menor que la velocidad de corte baja.
- El avance alto produjo un Ra mayor que un avance bajo.
- La profundidad de alta produjo un Ra mayor que la profundidad de corte baja.

El maquinado con uso de refrigerante produjo un nivel de Ra mucho menor que el maquinado sin refrigerante.

Figura-6.

TABLA-4. Tabla de análisis de varianza para Ra

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Velocidad de corte (A)	1	0.11157	0.11157	0.11157	17.02	0.000
Avance (B)	1	0.01519	0.01519	0.01519	2.32	0.138
Profundidad de corte (C)	1	0.15257	0.15257	0.15257	23.28	0.000
Refrigerante (D)	1	5.79199	5.79199	5.79199	883.59	0.000
Velocidad de corte*Avance (AB)	1	0.15434	0.15434	0.15434	23.54	0.000
Velocidad de corte*	1	0.03011	0.03011	0.03011	4.59	0.040
Profundidad de corte (AC)						
Velocidad de corte*Refrigerante (AD)	1	0.00079	0.00079	0.00079	0.12	0.731
Avance*Profundidad de corte (BC)	1	0.09736	0.09736	0.09736	14.85	0.001
Avance*Refrigerante (BD)	1	0.01945	0.01945	0.01945	2.97	0.095
Profundidad de corte*Refrigerante (CD)	1	0.01171	0.01171	0.01171	1.79	0.191
Velocidad de corte*Avance*	1	0.36154	0.36154	0.36154	55.15	0.000
Profundidad de corte (ABC)						
Velocidad de corte*Avance*	1	0.01159	0.01159	0.01159	1.77	0.193
Refrigerante (ABD)						
Velocidad de corte*	1	0.01520	0.01520	0.01520	2.32	0.138
Profundidad de corte*Refrigerante (ABD)						
Avance*Profundidad de corte*	1	0.20199	0.20199	0.20199	30.82	0.000
Refrigerante (BCD)						
Velocidad de corte*Avance*	1	0.40513	0.40513	0.40513	61.80	0.000
Profundidad de corte*Refrigerante (ABCD)						
Error	32	0.20976	0.20976	0.00656		
Total	47	7.59030				

La tabla ANOVA se analiza para un $\alpha = 0.05$ (probabilidad de cometer un error tipo I).

El modelo contiene seis efectos de interacción de dos factores. Los resultados indican que existe interacción significativa para Velocidad de corte*Avance=0.000, Velocidad de corte*Profundidad de corte = 0.04 y Avance*Profundidad de corte = 0.001 porque éstos los términos tienen valores p menores que 0.05. Dado que el

modelo es un diseño factorial completo no hay riesgo de que exista confusión.

El modelo contiene cuatro efectos principales, que se pueden evaluar en ausencia de interacciones significativas. Los valores p para tres (de cuatro) efectos principales menores que 0.05: Velocidad de corte = 0.000, Profundidad de corte = 0.000, y Refrigerante = 0.000. Por lo tanto, existe evidencia de un efecto significativo.

También existen cuatro efectos de interacción de tres factores. Solo Velocidad de corte*Avance*Profundidad de corte = 0.000, y Avance*Profundidad de corte*Refrigerante = 0.000 son significativos.

Existe un efecto de interacción de cuatro factores, Velocidad de corte*Avance*Profundidad de corte*Refrigerante = 0.000.

MODELO DE REGRESIÓN

El modelo de regresión contendría 16 términos, lo cual aunque lo hace bastante preciso, puede ser poco práctico a la hora de realizar cálculos para Ra. Se puede obtener un modelo reducido excluyendo ciertos términos que se pueden considerar poco significativos.

Para la exclusión de términos existe una regla que se aplica a la especificación de modelos reducidos, la cual establece que los términos deben ser jerárquicos. Es decir, para que un término se encuentre en un modelo, todos los términos de orden inferior contenidos en el mismo también deben encontrarse en el modelo.

Se consideró que el modelo de predicción puede contener hasta 1 término de tercer orden. Recalculando los coeficientes para el modelo A, B, C, AB, AC, BC, ABC se obtuvieron:

La tabla ANOVA se analiza para un $\alpha = 0.05$ (probabilidad de cometer un error tipo I).

Predictor	Coef
Intersección	31.593
Velocidad de corte (A)	-0.442
Avance (B)	-423.504
Profundidad de corte (C)	-44.728
Refrigerante (D)	-0.695
Velocidad de corte*Avance (AB)	6.159
Vel. de corte*Profundidad de corte (AC)	0.658
Avance*Prof. de corte (BC)	635.127

$$Ra = 31.593 - (0.442x_1) - (423.504x_2) - (44.728x_3) - (0.695x_4) + (6.159x_1x_2) + (0.658x_1x_3) + (635.127x_2x_3) - (9.257x_1x_2x_3)$$

Donde x_1, x_2, x_3, x_4 representan los valores (en unidades reales) de los factores A, B, C y D.

Tabla-6. Resultados experimentales para las diferentes combinaciones de factores

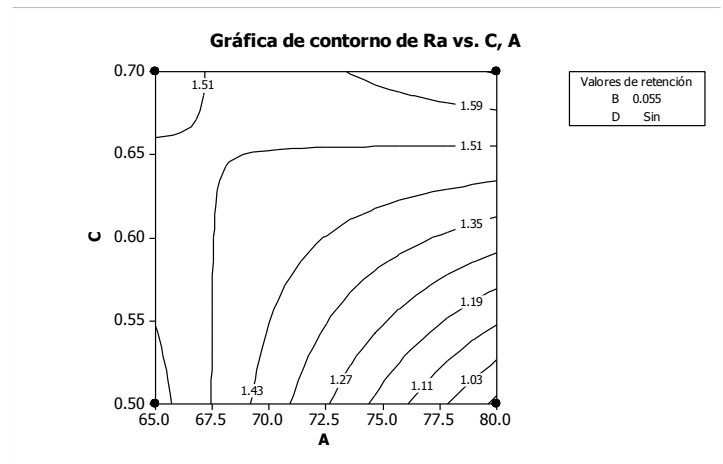
A	B	C	D	Ra	Ajuste	Residuo
65	0.055	0.5	0	1.6233	1.523	0.100
65	0.055	0.5	1	0.7283	0.828	-0.100
65	0.055	0.7	0	1.4817	1.502	-0.021
65	0.055	0.7	1	0.8283	0.808	0.021
65	0.08	0.5	0	1.3367	1.362	-0.025
65	0.08	0.5	1	0.6923	0.667	0.025
65	0.08	0.7	0	1.4700	1.508	-0.038
65	0.08	0.7	1	0.8513	0.813	0.038
80	0.055	0.5	0	0.9313	1.090	-0.158
80	0.055	0.5	1	0.5533	0.395	0.158
80	0.055	0.7	0	1.6757	1.516	0.159
80	0.055	0.7	1	0.6620	0.821	-0.159
80	0.08	0.5	0	1.6483	1.502	0.146
80	0.08	0.5	1	0.6617	0.808	-0.146
80	0.08	0.7	0	1.2383	1.402	-0.163
80	0.08	0.7	1	0.8700	0.707	0.163

Con un $R^2 = 97.5$ y un $R^2_{ajustado} = 95.7$, se puede afirmar que el modelo es adecuado.

Con las variables descodificadas se obtienen las gráficas de contorno para 2 factores a la vez (ver Figuras 18, 19, 20 y 21).

Para el presente proyecto, los análisis se realizaron buscando la minimización de la rugosidad superficial promedio. Razón por la cual la gráficas de retuvieron a un nivel bajo a fin de analizar los mínimos locales para cada caso.

El lector puede basarse en las gráficas y el modelo de regresión presentado anteriormente para maximizar la variable o buscar un valor determinado de Ra si así lo desea.



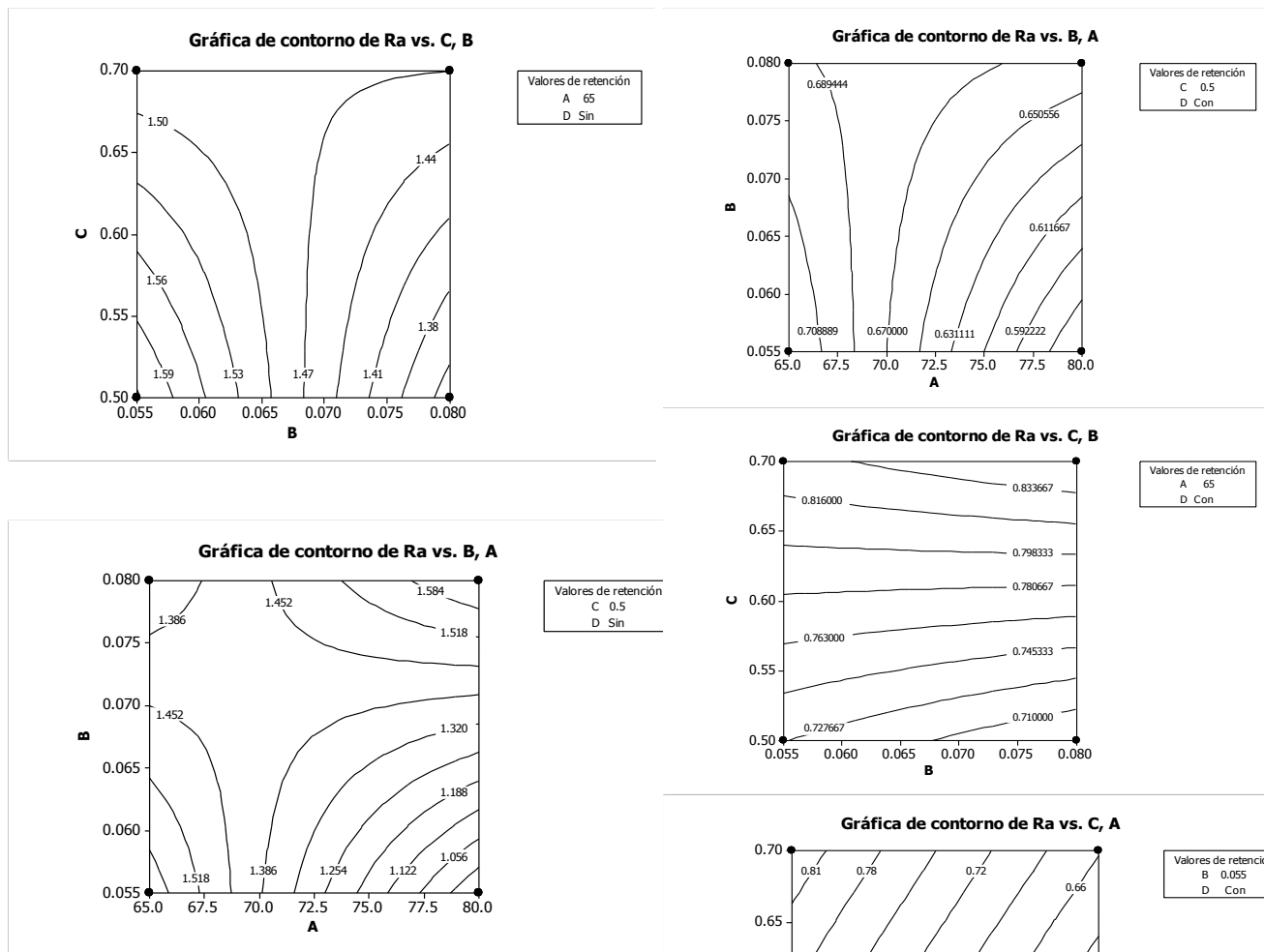


Figura-7. Graficas de contorno para Ra (Sin refrigerante)

Figura-8. Graficas de contorno para Ra (Con refrigerante)

III. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La rugosidad superficial en la operación de cilindrado ha sido medida para el mecanizado del acero AISI 4140 a diferentes condiciones de corte utilizando un diseño factorial 2^4 ; las siguientes conclusiones son válidas para las condiciones de corte para el cilindrado de acero AISI 4140, utilizando una herramienta de carburo recubierto MTCVD:

- El efecto de los parámetros en la rugosidad superficial ha sido evaluado con la ayuda del diseño factorial.
- Al realizar la optimización del modelo con el fin de minimizar la rugosidad, se confirmó que la configuración óptima se da cuando v se encuentra en el nivel alto, f en el nivel bajo, a en nivel bajo y en presencia de refrigerante para el dominio de los

factores, resultando un *Ra* mínimo de 0.553; el parámetro dominante es el uso de refrigerante, seguido de la profundidad de corte, la velocidad de corte y por último el avance (el avance muestra el mínimo efecto en la rugosidad superficial, comparado con los otros parámetros).

- Se obtuvo un modelo de regresión de primer orden a partir de un diseño factorial 2^4 , el cual permite estimar dentro de un margen de confiabilidad del 95.7%, cual es el valor de la rugosidad promedio *Ra*. En este modelo se confirmó el efecto de los factores velocidad de corte, avance, profundidad de corte y refrigerante y sus interacciones.
- Realizar estudios posteriores teniendo en cuenta otros factores como: temperatura de la herramienta de corte, fuerza de corte y se pueden analizar otras variables de respuesta que involucran mecanizado en seco y mecanizado en húmedo.

- [9] KALPAKJIAN, Serope. Manufactura-Ingeniería y tecnología. México: Pearson - Prentice Hall, 2002.
- [10] MONTGOMERY, D.C. Diseño y Análisis de Experimentos. Limusa Wiley, 2002.
- [11] KUEHL, ROBERT O. Diseño de experimentos. Mexico: Thomson Learning, 2001.

REFERENCIAS

- [1] BENARDOS, P.G., VOSNIAKOS, G.C. Predicting surface roughness in machining: a review. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003).
- [2] DAVIM, J. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. Journal of materials processing technology 116(2001)305-308.
- [3] VIVANCOS J., LUIS C.J., COSTA L., ORTIZ J.A. Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds. Journal of Materials Processing Technology 155-156 (2004) 1505-1512.
- [4] GHANI J.A., CHOUDHURY I.A., HASSAN H.H. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. Journal of Materials Processing Technology 145 (2004) 84-92.
- [5] KOPAC, J., BAHOR, M. Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product. Journal of Materials Processing Technology 92-93 (1999).
- [6] GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. México: Pearson - Prentice Hall, 1997.
- [7] Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia- N. O37. pp. 164-175. Julio, 2006
- [8] FERRÉ, R., VIVANCOS J., COBA M. Characterization of Surface Texture-State of Art. Reporte Interno PROHIPPI.