

# Estudio de los Parámetros de Mecanizado para Maximizar la Vida Útil de una Herramienta de Corte Tipo C-Bore en un Centro de Maquinado de 12 Estaciones

Ing. José Guadalupe Castañeda Moreno<sup>1</sup>, M. C. Filiberto Ramón Cipriano<sup>2</sup>

**Resumen**— En este trabajo de investigación se estudiaron los efectos de los parámetros de corte, tales como la relación de avance y velocidad de corte, sobre la vida útil de una herramienta en una operación de maquinado de un acero AISI/SAE C12L14 utilizando un diseño de experimentos a través del método Taguchi. Se utilizó una matriz ortogonal, relación señal/ruido (S/N) y análisis de varianza (ANOVA) para determinar los efectos y contribuciones de la velocidad de corte y la relación de avance en la variable de respuesta. Las operaciones de maquinado se llevaron a cabo mediante una herramienta de corte de carburo de tungsteno con recubiertos (TiN). Los experimentos se realizaron a tres velocidades de corte diferentes (2036, 2610 y 3376 rpm) con tres niveles de relación de avance diferentes (5, 6 y 7 segundos). Los parámetros de corte se optimizan utilizando la relación señal/ruido y el análisis de varianza. Los datos de resultados obtenidos revelaron que la velocidad (rpm) tiene un efecto más significativo sobre la rugosidad de la superficie, mientras que la relación de avance tiene el efecto más bajo.

**Palabras clave**—Parámetros de corte, Método de Taguchi, Rugosidad superficial, Desgaste de herramientas de corte, Optimización de mecanizado.

## Introducción

En la industria moderna el objetivo es fabricar cualquier producto a bajo costo, con alta calidad en poco tiempo, esto se ha logrado con la evolución de la ciencia de los materiales y ha permitido avanzar mucho en la tecnología de herramientas de corte para procesos de mecanizado. Un ejemplo de esto es la operación de boreado de diámetros internos que se emplea para remover material de la pieza de trabajo. La rugosidad de la superficie es un parámetro de calidad importante de la superficie maquinada/mecanizada. En la operación de maquinado, parámetros como velocidad (rpm), relación de avance (s), geometría de la herramienta de corte y materiales como el uso de cualquier fluido de corte afectará las tasas de remoción de material y las cualidades de mecanizado como la rugosidad de la superficie y dimensiones del producto.

En un estudio realizado por Sujit Kumar Jha en el que busca los parámetros de corte adecuados para optimizar la tasa de remoción de material, se observó que ésta se ve afectada principalmente por la velocidad de corte, la profundidad de corte y la relación de avance; al aumentar cualquiera de ellas se incrementa la tasa de remoción de material. El resultado basado en los análisis muestra que la relación de avance tiene más impacto en las características de rendimiento que la velocidad de corte y la profundidad de corte, aplicando el método Taguchi para optimizar los parámetros del proceso con un arreglo ortogonal L9 (1).

En otro estudio realizado por Quazi T Z, Pratik More, para la optimización de los parámetros de corte en un proceso de maquinado, utilizando el método de Taguchi para la selección de un tipo de herramienta, para una tasa alta de remoción de material (rebaba), el estudio se realizó con 3 especímenes (tipos de herramientas). En el estudio, se identificaron que la mayoría de los defectos en el torneado son inexactitudes en las dimensiones de una característica. Hay varias causas posibles para estos defectos, incluidas las siguientes:

El tiempo necesario para reemplazar una herramienta que ha excedido su vida útil y, por lo tanto, se ha desgastado demasiado para cortar con eficacia. Por lo general, este tiempo no se realiza en todos los ciclos, sino solo después de que se alcanza la vida útil de la herramienta.

Si los parámetros de corte como la relación de avance (s), la velocidad (rpm) del husillo o la profundidad de corte son demasiado altos, la superficie de la pieza de trabajo será más rugosa de lo deseado y puede contener marcas y/o rayones o incluso evidencia de sobrecalentamiento. Además, una gran profundidad de corte puede provocar vibraciones en la herramienta y provocar imprecisiones. A medida que se utiliza una herramienta, el borde

<sup>1</sup> Ing. José Guadalupe Castañeda Moreno es Supervisor de Manufactura en Sensata Technologies de México, S. de R.L. de C.V, lupecasta39@gmail.com

<sup>2</sup>M. C. Filiberto Ramón Cipriano se desempeña como Ingeniero de Aplicación Sénior en CIATEQ A. C. Centro de Tecnología Avanzada (CONACYT), El Marqués, Querétaro, México. firamon@ciateq.mx

afilado se desgastará y se volverá desafilado. Una herramienta desafilada es menos capaz de realizar cortes de precisión (2).

### Descripción del método

#### Material

El material de la pieza de trabajo usada para la experimentación fue acero AISI/SAE C12L14, con forma de barra redonda con diámetro de 24 mm x 3600 mm estirado en frío, como se muestra en la figura 1; a este material también se llama acero para el procesamiento automático de máquinas herramienta. Se utiliza para mecanizar la automatización y la línea de producción, principalmente para una fuerza pequeña y requisitos estrictos en herramientas de tamaño y acabado, como piezas de relojes, automóviles, máquinas y herramientas. Ver la Tabla 1 de propiedades mecánicas del acero y la Tabla 2 de su composición química (3).



Figura 1. Material en barra redonda, acero AISI/SAE C12L14.

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción			Límite de Fluencia			Alarga/ en 2" (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)	Relación de maquinabilidad 1212 EF = 100 %
	Mpa	Kgf/mm <sup>2</sup>	ksi	Mpa	Kgf/mm <sup>2</sup>	ksi				
<b>Estirado en frío</b>	<b>540</b>	<b>55</b>	<b>78</b>	<b>410</b>	<b>42</b>	<b>60</b>	<b>10</b>	<b>35</b>	<b>163</b>	<b>160</b>

Tabla 1. Propiedades mecánicas de acero AISI/SAE C12L14 (4).

%C	%Mn	%P	%S	%Pb
0.15	1.15	0.09	0.35	0.035

Tabla 2. Composición química de acero AISI/SAE C12L14 (4).

#### Herramienta

La herramienta de corte para el estudio es una herramienta para dar acabado tipo C-Bore, (Figura 2), fabricada en carburo de tungsteno de diámetro de 79.5 mm x 23.44 mm a la cual se busca incrementar la vida útil. El C-Bore es montado rígidamente en un portaherramientas con designación HI-Q / ERC 32, Figura 3.



Figura 2. C-bore, herramienta usada para el maquinado de la copa.

#### Estación de trabajo

Para el experimento se utilizó un centro de maquinado horizontal de la marca Hydromat de 12 husillos, modelo HW25-12 (Figura 3) con velocidad máxima de los husillos de 4,472 rpm. Se realizó el maquinado con aplicación de refrigerante (aceite de corte), se hizo de esta manera ya que debido al diseño del centro de maquinado no es posible desactivar la inyección del refrigerante.



Figura 3. Centro de maquinado HW25-12.

#### *Relación rugosidad (Ra) – Vida Útil*

La vida útil está establecida por la cantidad de ciclos realizados por la herramienta de corte que a su vez están determinados por la degradación del acabado superficial, lo que significa que la herramienta progresivamente está sufriendo desgaste. El rango del valor aritmético de la rugosidad (Ra) que pide el dibujo del cliente es de 0 a 2.54  $\mu\text{m}$  siendo el valor máximo permitido 2.54  $\mu\text{m}$ , una vez que el valor de Ra en el fondo de la copa está cercano al máximo permitido, el operador pide el reemplazo de la herramienta. Por apego a procedimiento, la rugosidad (Ra) es medida en 2 piezas cada 4 horas; conforme el valor de Ra se acerca al máximo, el operador incrementa la frecuencia de piezas medidas. Para este estudio se midieron 5 piezas cada 2 horas.

#### *Selección de los factores y sus niveles*

Los factores de control o parámetros de corte: velocidad (rpm) y relación de avance (s), así mismo las condiciones para el mecanizado del AISI/SAE C12L14 se presentan en la Tabla 3, donde se definen tres niveles (Nivel 1 – bajo, Nivel 2 – medio y Nivel 3 – alto) para cada variable de corte. Los niveles variables se eligen dentro de los intervalos recomendados por el fabricante de la herramienta de corte y de acuerdo con reportes de investigación de otros autores, considerando un maquinado a alta velocidad (5). Con los aspectos antes mencionados, se plantearon para el diseño del experimento tres velocidades (rpm) de corte y tres valores para la relación de avance (s), que, de acuerdo con el estado del arte, aún no han sido estudiadas hasta el momento.

Símbolo	Factores de control	Niveles		
		1	2	3
A	Velocidad (rpm)	2,036	2,610	3,376
B	Relación de avance (s)	5	6	7

Tabla 3. Parámetros de corte y sus niveles.

#### *Método de Taguchi*

El diseño robusto tiene su origen en las ideas del ingeniero japonés Genichi Taguchi, quien desarrolló su propia filosofía y métodos de ingeniería de la calidad desde la década de 1950. Este es un método de diseño basado en una matriz ortogonal ( $L9, 3^2$ ). Los arreglos ortogonales son diseños propuestos por Taguchi que, como su nombre lo indica, tienen la propiedad de ortogonalidad. Este método se utiliza para encontrar el mejor conjunto de valores de factores controlables para hacer que el diseño sea menos sensible con la variación del ruido, lo que significa que Taguchi hace que un diseño sea más robusto (6). De acuerdo con el arreglo ortogonal, los experimentos se realizaron con sus factores y sus niveles como se menciona en la Tabla 4. El diseño experimental con los valores seleccionados de los factores se muestra en la Tabla 3. Para el diseño del experimento utilizando el método de Taguchi, seleccionamos una matriz  $L9$ . El número total de experimentos realizados en el trabajo experimental es igual a 9.

No. Experimento	Factores de control	
	Velocidad (rpm)	Avance (s)
1	2,036	7
2	2,036	6
3	2,036	5
4	2,610	7
5	2,610	6
6	2,610	5
7	3,376	7
8	3,376	6
9	3,376	5

Tabla 4. Arreglo ortogonal L9 de Taguchi y valores de los factores de control.

El principal carácter de medición del rendimiento de Taguchi es la relación señal/ruido o simplemente conocida como relación S/N. Se utiliza para reducir la variación de la señal y optimizar los factores de entrada para producir la mejor respuesta posible. Hay tres casos posibles para el cálculo de la relación S/N, la empleada en este estudio es dada por la ecuación 1, “más-alto-es-mejor” (6).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2_i} \right) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

*Procedimiento del experimento*

Se muestra un diagrama de flujo simplificado con las actividades llevados a cabo en el desarrollo del experimento, Figura 4. A continuación, se describe el procedimiento metodológico realizado durante el experimento:

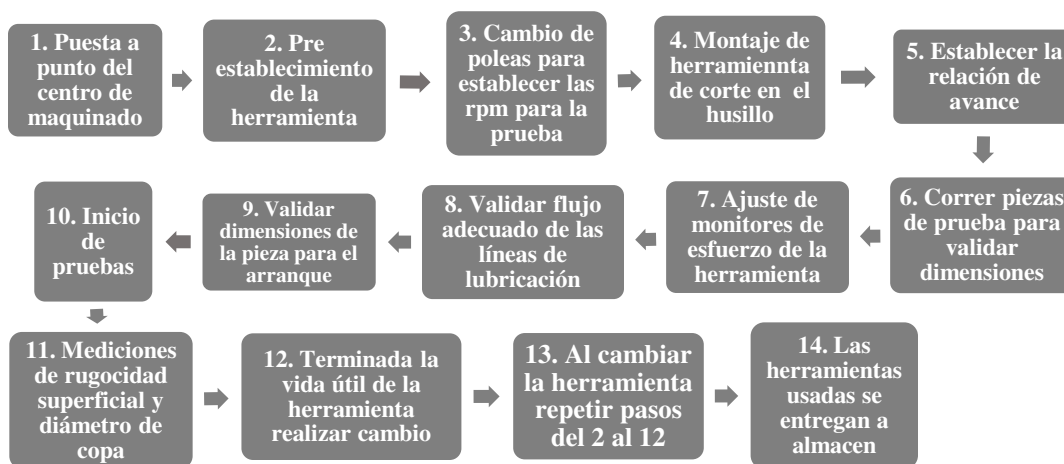


Figura 4. Diagrama de flujo de las actividades realizadas en el experimento.

**Comentarios finales**

*Resumen de resultados*

Los resultados experimentales para la rugosidad superficial promedio, Ra, correspondiente al diseño experimental usando una matriz ortogonal L9 que se enumeran en la Tabla 5. El valor de la rugosidad Ra representa el valor promedio de 100 lecturas por prueba.

No. Corrida	V (rpm)	TC (s)	No. Ciclos	Ra(μm)
1	2,036	7	11,030	1.64
2	2,036	6	11,400	1.84
3	2,036	5	12,500	1.74
4	2,610	7	7,600	1.72
5	2,610	6	14,350	1.31
6	2,610	5	8,600	1.47
7	3,376	7	3,970	0.97
8	3,376	6	3,650	1.01
9	3,376	5	4,110	1.05

Tabla 5. Arreglo ortogonal L9 diseño de experimento de Taguchi y resultados de Ra y No. De ciclos obtenidos.

La cantidad de ciclos de la herramienta de corte están determinados por la degradación de la rugosidad superficial, lo que significa que la herramienta progresivamente está sufriendo desgaste. Este estudio busca incrementar la vida útil del c-bore experimentando con tres niveles de velocidades (rpm) y tres niveles de avance (s) para obtener parámetros que permitan que la herramienta presente menor desgaste y de esta manera incrementar los ciclos de corte.

*Análisis de efectos principales de medias y relación señal – ruido (S/N)*

Observando las gráficas de efectos principales de S/N y de medias, mostradas en la Figura 5 y Figura 6, para S/N, independientemente de la categoría de la característica de rendimiento, la mayor relación S/N corresponde a la mejor característica de rendimiento, como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, el nivel óptimo de los parámetros del proceso es el nivel con la relación S/N más alta, velocidad (rpm) en nivel 1 y en avance (s) en nivel 2, Figura 6. Como el objetivo es maximizar el número de ciclos de la herramienta, considerando la característica de calidad denominada “más alto es el mejor”, se observan en el gráfico de medias, Figura 5, los valores que maximizan el número de ciclos: en nivel 1 (2036 rpm) y la relación de avance en nivel 2 (6 s). El gráfico del efecto principal en la Figura 5, indica que el número de ciclos incrementa al elevarse el valor del promedio del acabado superficial (Ra) en el fondo de la copa.

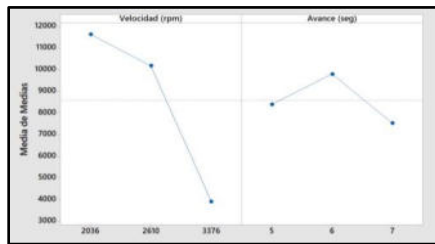


Figura 5. Efectos principales para medias de datos para No. De ciclos.

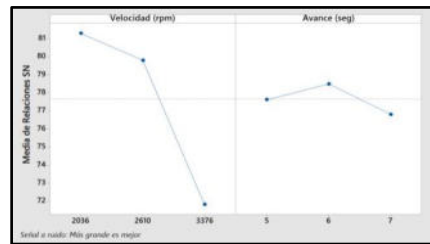


Figura 6. Efectos principales para relaciones S/N para No. De ciclos.

*Análisis de varianza, Anova*

El análisis de varianza se utiliza para averiguar qué factor es la respuesta de salida de efecto más significativo. La Tabla 6 muestra que la velocidad (rpm) tiene el mayor efecto sobre la rugosidad del fondo de la copa y con mayor significancia el avance (s). El factor efectivo más alto es la velocidad (2036 rpm) y en seguida la relación de avance (6 s).

Fuente	Grados de Libertad (GL)	Suma de Cuadrados (SS)	Media de los cuadrados. (MS)	Relación F	Contribución Valor p
Avance (s)	1	1135350	1135350	0.21	0.664
Velocidad (rpm)	2	101290756	50645378	9.49	0.02
Error	5	26686783	5337357		
Total	8	129112889			

Tabla 6. Resultados del ANOVA para el numero de ciclos.

## Conclusiones

### Número de ciclos realizados por la herramienta de corte

1. El valor máximo de números de ciclos encontrado en los ensayos realizados fue de 14,350 ciclos en la corrida 5, frente al valor de 3,650 ciclos de la corrida 8.
2. Los parámetros que maximizan la vida útil de la herramienta son: velocidad = 2,036 rpm y la relación de avance = 6 s. Esto es debido a que las tres pruebas realizadas con la velocidad (rpm) propuesta, la vida de la herramienta se mantuvo estable respecto al número de ciclos realizados por la herramienta de corte en los 3 ensayos.
3. Se observa en el Tabla 5 que la velocidad de 2,610 rpm en sus tres corridas muestra una diferencia considerable del valor mayor al valor menor. Y respecto a la velocidad de 3,376 rpm, los valores en el número de ciclos están por debajo de la media de las tres primeras corridas mencionadas.

### Desgaste de la herramienta de corte

1. La velocidad (rpm) es el factor que más afecta el desgaste de la herramienta.
2. En las condiciones de boreado del acero AISI/SAE C12L14 ensayadas, se observa sólo un tipo de desgaste de herramienta. Los tipos de desgaste significativos en la herramienta de corte (C-bore) fueron el filo recrecido y la fractura.
3. Se confirma que el desgaste que presenta la herramienta se concentra en un punto específico. Este punto o sección de la herramienta es donde se forma el ángulo entre los filos que se usan para realizar la pared del diámetro de copa y el fondo de copa. El punto en que estos dos filos convergen es el área de la herramienta que sufre mayor desgaste o desgaste prematuro.

### Relación entre la rugosidad y el desgaste de la herramienta de corte

1. Para velocidades (rpm) elevadas se obtienen mejor calidad en la superficie maquinada, pero se observa que los ciclos de corte disminuyen por desgastes prematuros de la herramienta. Por lo tanto, a menor velocidad (rpm) se incrementa el valor de la rugosidad, pero la vida de la herramienta se maximiza.
2. Se verifica que existe una relación entre el desgaste de la herramienta de corte y la rugosidad de la superficie maquinada obtenida en el experimento.

## Referencias

1. Sujit Kumar, Jha. *3OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS FOR OPTIMAL MRR DURING TURNING STEEL BAR USING TAGUCHI METHOD AND ANOVA.*, India : IJMERR, 2014, Vol. 3.
2. Vipul, Sonamane, More, Pratik y T. Z., Quazi. s.l. *A case study of Taguchi Method in the Optimization of turning Parameters.*: International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Febrero de 2013, Vol. 3. ISBN 2250-2459.
3. Songshun Steel es. Steel, Songshun. 12L14 Acero • JIS SUM24L • DIN 1.0718 - [Online] 2012 - 2021. [Cited: Noviembre 07, 2020.] <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=acero+C12L14>.
4. Peña Puerta, Arley Alberto and Rendón Marín, Hugo Alexander. *GUÍA Y TABLAS TÉCNICAS DE LOS ACEROS.* MEDELLÍN : Icontec Internacional, 2013. 978-84-613-0053-2.
5. LÓPEZ LUIZ, NORBERTO. *ESTUDIO DEL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE CORTE Y DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL MAQUINADA EN UN PROCESO DE TORNEADO CON INSERTO DE WC RECUBIERTO (PVD Y CVD) SOBRE UN ACERO ENDURECIDO AISI D2.* CIATEQ A. C., Aguascalientes, Ags. : 2020.
6. Gutiérrez Pulido, Humberto and de la Vara Salazar, Román. *Análisis y diseño de experimentos.* México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V., 2008. 970-10-6526-3.

## Notas Biográficas

El Ing. **José Guadalupe Castañeda Moreno** es supervisor de manufactura en Sensata Technologies de México, S. de R.L. de C.V, en la Ciudad de Aguascalientes, Ags., Actualmente cursando su Postgrado de Maestría en Manufactura Avanzada en el CIATEQ A. C., Titulado de la Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC) como Ing. Mecánico Electricista con acentuación en mecánica. Trabajó en empresas como CEMEX, S.A.B. de C.V. Caterpillar Torreón.

El **M. C. Filiberto Ramón Cipriano** se desempeña como ingeniero especialista de aplicación sénior en la Dirección de Ingeniería Virtual y Manufactura de CIATEQ A. C. Egresado del Instituto Tecnológico de Celaya como Maestro En Ciencias en Ingeniería Mecánica con la especialidad de Diseño Mecánico. Ha participado en proyectos de desarrollo tecnológico e investigación, enfocados a la conceptualización, diseño y modernización de maquinaria de aplicación especial y sus componentes para empresas como Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), NISSAN MEXICANA S. A. DE C. V., Cummins S. De R. L. De C. V., SAFRAN Snecma America Engine Services, entre otras.