

ppi 201502ZU4659

Esta publicación científica en formato digital es
continuidad de la revista impresa

ISSN 0254 -0770 / e-ISSN 2477-9377 / Depósito legal pp 197802ZU38



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Dr. Humberto Fernández Morán
"Mis luchas son las del Quijote,
batallas que uno pierde, pero
gana la causa".



Influencia de los Parámetros de Corte en el Torneado Duro del Acero AISI 4140

Luis Wilfredo Hernández-González ¹  Hiovanis Castillo-Pantoja ¹ 
Dagnier Antonio Curra-Sosa ¹  Enrique Ernesto Zayas-Figueras ² 
Roberto Pérez-Rodríguez ¹ 

¹ Centro de Estudios de Diseño y Fabricación Asistidos por Computadoras (CAD/CAM), Universidad de Holguín (UHo), Cuba

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Autor de correspondencia: wilfredo.uho@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v47a04>

Recepción: 04 enero 2023 | Aceptación: 05 octubre 2024 | Publicación: 09 diciembre 2024

Resumen

Los intercambiadores de calor de placas soldadas son equipos fundamentales para los procesos de esterilización en la industria farmacéutica, por lo que es crucial diseñar planes de mantenimiento eficaces para evitar fallos que puedan comprometer la confiabilidad de estos procesos. El objetivo de esta investigación fue determinar, mediante la simulación de Montecarlo, una política óptima de mantenimiento para estos intercambiadores. Se utilizó una metodología descriptiva, aplicada y transversal basada en un diseño de campo. Se estudiaron siete intercambiadores de calor en una planta farmacéutica, sirviendo como población y muestra. Los instrumentos de recolección de datos incluyeron la revisión de registros existentes y la validación por expertos. El estudio demostró que la distribución Weibull es una herramienta útil para modelar los tiempos de falla de los intercambiadores y reveló que el tiempo óptimo de reemplazo es de aproximadamente 1,7 años, con un costo mínimo asociado de US\$2.139. Estos hallazgos resultan esenciales para la planificación eficaz del mantenimiento y reemplazo de los equipos, así como para la optimización de los recursos económicos. Sin embargo, se reconoce la necesidad de una muestra más grande y de más datos para reforzar estas conclusiones.

Palabras clave: parámetros de corte; rugosidad superficial; temperatura de corte; torneado duro.

Influence of Cutting Parameters on the Hard Turning of AISI 4140 Steel

Abstract

The metal cutting process by machining is generally very resource consuming and complex; therefore, the application of hard machining has grown considerably as a suitable alternative since it represents a sustainable technology for this purpose. However, there are some aspects that need to be addressed, especially those related to the performance of this process. Consequently, in this work, the effects of feed rate and cutting speed on cutting temperature and surface roughness during hard turning of AISI 4140 steel have been analyzed, using the Taguchi methodology to optimize the parameters of cutting. Likewise, the models were determined through a multiple regression analysis, studying their suitability with a residual test. Cutting speed and feed rate were statistically significant factors on cutting temperature and surface roughness, respectively. The surface roughness values obtained

varied within an acceptable range, allowing the grinding operation to be replaced. The optimum machining parameters for minimizing cutting temperature and surface roughness were the lowest values of feed rate and cutting speed.

Keywords: cutting parameters; cutting temperature; hard turning; surface roughness.

Influência dos Parâmetros de Corte no Torneamento Duro do Aço AISI 4140

Resumo

Os trocadores de calor a placas soldadas são equipamentos essenciais para processos de esterilização na indústria farmacêutica, por isso é crucial desenhar planos de manutenção eficazes para evitar falhas que possam comprometer a confiabilidade desses processos. O objetivo desta pesquisa foi determinar, através de simulação de Monte Carlo, uma política ótima de manutenção para estes trocadores. Foi utilizada uma metodologia descritiva, aplicada e transversal a partir de um desenho de campo. Foram estudados sete trocadores de calor em uma planta farmacêutica, servindo como população e amostra. Os instrumentos de coleta de dados incluíram revisão dos registros existentes e validação por especialistas. O estudo demonstrou que a distribuição Weibull é uma ferramenta útil para modelar tempos de falha de trocadores e revelou que o tempo ideal de substituição é de aproximadamente 1,7 anos, com um custo mínimo associado de US\$ 2.139. Estas conclusões são essenciais para um planejamento eficaz da manutenção e substituição de equipamentos, bem como para a otimização de recursos econômicos. No entanto, reconhece-se a necessidade de uma amostra maior e de mais dados para reforçar estas conclusões.

Palavras-chave: parâmetros de corte; rugosidade superficial; temperatura de corte; torneamento difícil

Introducción

La operación de mecanizado como el torneado duro es un proceso de acabado muy adecuado porque son eliminadas algunas elaboraciones, tales como el maquinado de desbaste y el rectificado fino (Konig et al., 1984). Durante el torneado duro, se genera una gran cantidad de calor en la interfaz viruta-herramienta. Esta generación de calor tiene un gran efecto en la vida útil de las herramientas de corte, así como en la calidad de la superficie de la pieza de trabajo. Por lo tanto, la selección de los parámetros de corte adecuados, la herramienta de corte (como el carburo recubierto o la plaquita cerámica) y el material de la pieza de trabajo, son importantes para mejorar la respuesta de calidad y el volumen de material eliminado (Sahu et al., 2014).

El concepto de temperatura óptima de corte se presentó como la primera ley de corte de metales (ley de Makarow); estableciendo que, para una combinación dada de herramienta de corte y materiales de trabajo existe una temperatura de corte, en la cual se conjugan la mínima tasa de desgaste de la herramienta, la mínima fuerza de corte y la máxima calidad de la superficie mecanizada (Astakhov, 2004). Como la velocidad de corte es la que más contribuye a la temperatura de corte, la velocidad de corte que genera la temperatura de corte óptima debe observarse como la velocidad de corte óptima (Astakhov, 2006b). En consecuencia, es fundamental mantener bajo control las temperaturas de corte que están relacionadas con los parámetros de corte y el medio de corte óptimos; por lo tanto, el uso de un fluido de corte en las operaciones de corte de metales es un método efectivo (Şirin et al., 2021). Los fluidos de corte se han utilizado generalmente para reducir la temperatura del área de corte, la fricción en la interfaz herramienta de corte-pieza de trabajo y herramienta de corte-viruta, y para facilitar la salida de la viruta; todo ello con el objetivo de reducir el desgaste de la herramienta de corte y las fuerzas de corte, así como obtener una rugosidad superficial adecuada de la pieza mecanizada, según Arshinov y Alekseev (1970), Boothroyd y Knight (2006), y Brinksmeier et al. (2015). Sin embargo, el método de lubricación tradicional utilizado en el corte tiene desventajas, tanto para el ambiente como para la salud de los empleados (Dhar et al., 2006). Los fluidos de corte están contenidos frecuentemente en largos sistemas de recirculación y son bombeados continuamente a muchas operaciones de maquinado. Por consiguiente, una parte del fluido es atomizado en gotas muy pequeñas, lo que trae como consecuencia una persistente niebla que contamina el aire. Los efectos negativos de la neblina incluyen la disminución de la calidad del aire, la pérdida de seguridad, la posibilidad de propagación del fuego a causa de una chispa y los problemas ambientales. El suministro de fluidos de corte en las máquinas herramienta provoca la contaminación del aire, del suelo y del agua (Erdel, 2003). De igual manera, la exposición prolongada de los operarios a la neblina de aceite puede inducir la aparición de cáncer y otras enfermedades de la piel, cáncer del sistema digestivo y asma (Leith, 1996).

La rugosidad superficial, por su parte, es la característica más utilizada para definir la calidad de las piezas mecanizadas (Carou, 2013; Kant, 2016). La importancia de la rugosidad superficial se puede apreciar en la gran cantidad de propiedades de los productos que dependen, al menos parcialmente, de la calidad superficial. Entre estos atributos se pueden citar la fricción de la superficie, el desgaste, la transmisión de calor, la capacidad de distribuir y soportar un lubricante, la capacidad de ser recubierta, la resistencia a fatiga o la resistencia a la corrosión (Çolak et al., 2007; Kivak et al., 2012; Kant, 2016); aunque, para lograr una rugosidad de la superficie por debajo de un cierto límite, generalmente se requiere un aumento exponencial del consumo de energía y una disminución de la productividad (Kant, 2016).

Tradicionalmente, el rectificado es el método convencional o la operación dominante en el acabado de piezas templadas. Sin embargo, las innovaciones de las últimas dos décadas en cuanto a la rigidez y precisión de las máquinas herramienta y la fabricación de plaquitas de corte, materiales, calidades, geometrías y recubrimientos, han provocado un incremento en el uso del torneado en duro (Klocke et al., 2005). No obstante, las principales limitaciones del mecanizado duro, son: el costo de herramientas de corte por unidad producida es significativamente mayor en el mecanizado duro en comparación con el rectificado; en algunos casos, el tamaño o la geometría de una pieza simplemente no se prestan para el torneado duro; en su mayoría, se requiere de alta rigidez del sistema tecnológico (máquina herramienta - herramienta de corte - dispositivo - pieza de trabajo), para un mecanizado duro exitoso; existen dudas sobre el uso o no del refrigerante y el acabado de la superficie de las piezas mecanizadas se deteriora con el desgaste de la herramienta de corte (Grzesik, 2008; Astakhov, 2011).

Se reportan diversos estudios que abordan el torneado duro de aceros utilizados en la fabricación de elementos de máquinas y su influencia en la rugosidad superficial y/o la temperatura de corte (Suresh et al., 2012; Chinchankar y Choudhury, 2014; Pal et al., 2014; Sahu et al., 2014; Gosai y Bhavsar, 2016; Mia y Dhar, 2016; Das et al., 2017; Kumar y Agarwal, 2017; Das et al., 2018; Grzesik, 2018; Gunjal y Patil, 2018; Sampaio et al., 2018; Branco et al., 2018; Khan y Bhivsane, 2018; Abbas et al., 2020a; Abbas et al., 2020b; Hasbrouck et al., 2020; Santhosh et al., 2021; Shaikh et al., 2021; Iqbal et al., 2022); aunque, los estudios que evalúan simultáneamente los efectos de los parámetros de maquinado sobre la temperatura de corte y la rugosidad superficial son más escasos. Por ejemplo, Sahu et al. (2014) investigaron el mecanizado duro bajo condiciones en seco y de enfriamiento, mientras que Das et al. (2017) vincularon el mecanizado duro con plaquitas de metal duro recubiertas; sin embargo, en estos trabajos no se evaluaron los efectos del avance. También, Pal et al. (2014) analizaron los efectos de los parámetros de corte en las variables dependientes señaladas; y finalmente, Mia y Dhar (2016) determinaron los valores óptimos de los parámetros de corte en el torneado con plaquitas de carburo recubiertas. En estas investigaciones no se mencionó el número de réplicas en sus pruebas; por lo tanto, se considera que aún existen brechas del conocimiento, relacionadas con este proceso. Por tanto, en la presente investigación se planteó como objetivo analizar el efecto de la velocidad de avance y la velocidad de corte en la temperatura de corte y la rugosidad superficial durante el torneado duro del acero AISI 4140, haciendo uso de la metodología de Taguchi para optimizar los parámetros de corte.

Materiales y Métodos

La investigación consistió en el estudio experimental de la influencia del avance y la velocidad de corte en la temperatura y en la rugosidad superficial, durante la operación de torneado duro en seco del acero AISI 4140 con una plaquita de metal duro recubierta en un torno convencional. Para ello, se utilizó un diseño factorial completo con dos réplicas, por lo que se realizaron 12 ensayos. Se utilizaron tres niveles de velocidad de corte y dos de avance, mientras que la profundidad de corte se mantuvo constante.

Características de la máquina herramienta, material de las muestras y herramienta de corte

Para el experimento se utilizó el torno universal C11MT. Las principales características de esta máquina herramienta son las siguientes: rango de rotación del husillo de 11,5 a 2000 r/min; potencia del motor principal de 7,7 kW; rango de avance longitudinal de 0,02 a 12 mm/r. La pieza de trabajo se montó en un plato autocentrante de tres mordazas. En la Tabla 1 se muestran las variables estudiadas. La profundidad de corte se mantuvo constante ($a=0,5$ mm). La selección de los valores de los parámetros de mecanizado, las características de la máquina herramienta y de la herramienta de corte, se basó en datos de la literatura (Suresh et al., 2012; Chinchankar y Choudhury, 2014; Pal et al., 2014; Sahu et al., 2014; Gosai y Bhavsar, 2016; Mia y Dhar, 2016; Das et al., 2017; Kumar y Agarwal, 2017; Das et al., 2018; Grzesik, 2018; Gunjal y Patil, 2018; Sampaio et al., 2018; Branco et al., 2018; Khan y Bhivsane, 2018; Abbas et al., 2020a; Abbas et al., 2020; Hasbrouck et al., 2020; Santhosh et al., 2021; Shaikh et al., 2021; Iqbal et al., 2022), así como en la práctica industrial actual.

Tabla 1. Variables dependientes e independientes consideradas en esta investigación.

Variable	Tipo de variable	Medida
Temperatura de la zona de corte	Dependiente	T (°C)
Rugosidad superficial	Dependiente	R _a (μm)
Velocidad de corte	Independiente	v: 61,38; 86,66; 122,77 m/min
Avance por revolución	Independiente	f: 0,1; 0,16 mm/r

T: temperatura de la zona de corte, Ra: rugosidad superficial, v: velocidad de corte, f: avance por revolución.

La selección de las muestras, herramientas de corte y el orden de los ensayos se realizó de forma aleatoria. Se utilizó el acero laminado de baja aleación AISI 4140 como material para las probetas; este es un acero muy usado en la fabricación de elementos de alta responsabilidad, tales como: discos de fricción, ruedas dentadas, camisas de cilindros sin nitruro, discos de turbina, ejes de transmisión, bielas, etc. (Lee, 2007; Llanes y Falcon, 2019). Los especímenes fueron cilindros de 46 mm de diámetro y 90 mm de largo. La longitud maquinada en el experimento fue de 40 mm. El inserto seleccionado fue el metal duro GC3015 (HC) – P10 con recubrimiento CVD (*Chemical Vapour Deposition*) (Sandvik). El inserto se montó en un portaherramientas con dimensiones de 125 x 24 x 20 mm. Los instrumentos de medición de temperatura se instalaron en este portaherramientas.

Equipos de medición utilizados en el experimento

Se utilizó un durómetro CV-600A Tecnimetal para medir la dureza de las muestras en varios puntos. Para cuantificar la temperatura se aplicó la técnica de radiación (Grzesik, 2017), donde el registro de la réplica uno corresponde con la medición de un campo; es decir, por termografía infrarroja (cámara termográfica Flir E40), mientras que la medición en otro punto se realiza con un termómetro infrarrojo (modelo UT305C UNI-T), correspondiente a la réplica dos. La rugosidad superficial (desviación media aritmética) se determinó con el método de comparación con una muestra estándar de acero, recomendado para piezas de acero torneadas (Groover, 2013; Fitzpatrick, 2014).

Diseño experimental, análisis estadístico y enfoque de optimización

Después del experimento, se realizó un análisis estadístico basado en el estudio de la varianza y la optimización de la relación señal/ruido (S/R) de Taguchi (Taguchi *et al.*, 2005). La investigación consistió en el estudio experimental de la influencia del avance y la velocidad de corte en la temperatura y en la rugosidad superficial durante la operación de torneado duro en seco del acero AISI 4140. Se utilizó el programa MiniTab 18.

Resultados y Discusión

Dureza de las probetas

La dureza de la pieza se midió en varios puntos de la misma y develó un valor medio de 51±0,5 HRC, lo que corresponde a una pieza templada y revenida, evidenciando sus características metalográficas (Callister y Rethwisch, 2014).

Análisis de la temperatura en la zona de corte

En la Figura 1 se presenta una comparación de los resultados de la temperatura de corte medida con la cámara termográfica y el termómetro infrarrojo, al variar la velocidad de corte. Según el termómetro infrarrojo, existe una ligera tendencia a acrecentar la temperatura con el aumento de la velocidad de corte; resultado que coincide con el estudio de Roy y Ghosh (2014), en el cual se muestra que los valores de temperatura medidos con la cámara termográfica son algo mayores que los registrados con el termómetro infrarrojo. Las curvas de la Figura 1 sugieren que existen diferencias entre las dos curvas. Para determinar si las diferencias aparentes son estadísticamente significativas y no es solo por los tamaños pequeños de las muestras, se realizó una prueba de hipótesis; es decir, la prueba-F (Fisher), para evaluar una hipótesis específica acerca de las desviaciones estándares de las poblaciones de las cuales provienen las dos muestras. Hipótesis nula: $\sigma_1 = \sigma_2$, hipótesis alternativa: $\sigma_1 < \sigma_2$, $f = 0,143$ valor-P= 0,251. Puesto que el valor-P calculado no fue menor que 0,05; no se puede rechazar la hipótesis nula. El análisis estadístico muestra que el tipo de instrumento de medición de temperatura utilizado en los experimentos, no influye significativamente en la medición de los valores obtenidos de temperatura de corte, para un nivel de confianza del 95 %. Por tanto, ambos son válidos para la experimentación, demostrando que el tipo de instrumento de medición para

medir la temperatura (cámara termográfica y termómetro infrarrojo) no influye significativamente en la calidad de las mediciones.

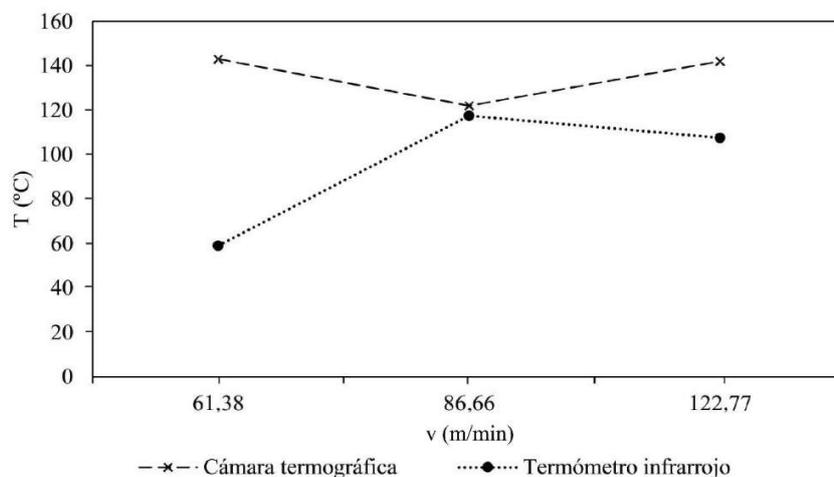


Figura 1. Efecto del aumento de la velocidad de corte (v) en la temperatura (T) medida con la cámara termográfica y el termómetro infrarrojo.

Modelado predictivo de rugosidad superficial y temperatura de corte

Con el fin de definir la relación entre una variable dependiente y una o más respuestas, se utilizó el análisis de regresión. De acuerdo con Montgomery y Hunger (2018), se puede considerar que el modelo estadístico representa bien el comportamiento de la variable respuesta cuando el coeficiente de determinación (R^2) es superior al 70 %, lo cual se observó para todos los casos. De esta manera, se analizaron varios modelos considerando R^2 , el valor P del análisis de varianza y la suma de los cuadrados de los residuos, entre otros criterios. Los modelos matemáticos para la temperatura de corte (Ecuación 1) y la rugosidad de la superficie (Ecuación 2), basados en los resultados experimentales, fueron:

$$T = 0,884 v + 244 f \quad (1)$$

$$R_a = 21,76 f + 0,000 041 v^2 \quad (2)$$

El valor de R^2 para la Ecuación 1 fue de 87,51 % y para la Ecuación 2 de 73,71 %. Estas magnitudes indican que los modelos estadísticos representan de manera adecuada el comportamiento de la variable de respuesta (Montgomery y Hunger, 2018). Al respecto, para el caso de la rugosidad superficial, en las investigaciones de Suresh *et al.* (2012), Pal *et al.* (2014), Khan y Bhivane (2018), Abbas *et al.* (2020), y Santhosh *et al.* (2021), se obtuvieron valores de R^2 muy cercanos a la unidad, mientras que Das *et al.* (2017) obtuvieron valores cercanos al 90 %. Para el caso de la temperatura de corte, en las investigaciones de Pal *et al.* (2014), Chinchani y Choudhury (2014), y Gosai y Bhavsar (2016), se obtuvieron también valores de R^2 muy cercanos a uno. Todos estos coeficientes indican un grado de asociación fuerte entre las variables dependientes e independientes. Desde este punto de vista, los modelos antes mencionados son superiores a los obtenidos en el presente estudio, pero en este caso se tuvieron en cuenta solamente dos factores de los muchos que influyen en la temperatura de corte y en la rugosidad superficial, y los modelos determinados son de baja complejidad.

Análisis de varianza del modelo de regresión

En primer lugar, se verificó la significación estadística de las variables independientes y de los modelos (Ecuaciones 1 y 2). En la Tabla 2 se incluye el resumen del análisis de varianza para la rugosidad de la superficie maquinada y la temperatura de corte, para un nivel de confianza del 95 %. Los resultados para la temperatura de corte muestran que el valor de P para el modelo de regresión (Ecuación 1) fue menor a 0,05; y, por lo tanto, es estadísticamente significativo para el nivel de confianza seleccionado. De esta forma, se asevera la validez de la temperatura como variable de estudio en los experimentos. Sin embargo, el avance y la velocidad de corte no resultaron estadísticamente significativos ($P > 0,05$), indicando que son variables que tienen una influencia menos predominante que la temperatura (tienen menos influencia en las variables dependientes, Tabla 1).

Tabla 2. Resumen del análisis de varianza del modelo de regresión para la rugosidad superficial y la temperatura de corte obtenido para el torneado duro del acero AISI 4140.

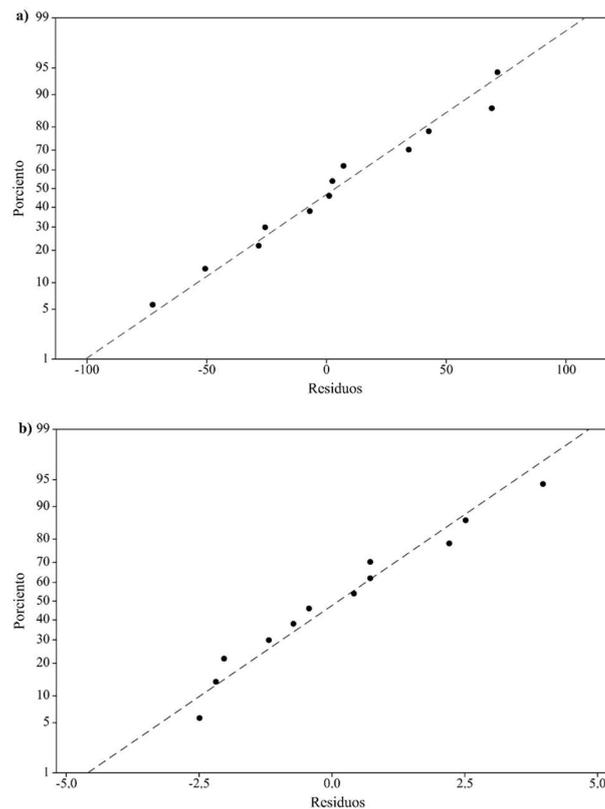
Fuente	Ra	T
	Valor P	Valor P
Modelo	0,00	0,00
V	-	0,06
F	0,03	0,42
v^2	0,74	-

R_a: rugosidad superficial, T: temperatura de corte, v: velocidad de corte, f: avance por revolución.

Por otra parte, el modelo de regresión de la Ecuación 2 y el avance ($P=0,03$) fueron estadísticamente significativos para la rugosidad de la superficie de la pieza mecanizada, pero no para el cuadrado de la velocidad de corte ($P= 0,74$), en un nivel de confianza del 95 % (Tabla 3).

Control del ajuste del modelo

La adecuación de los modelos fue investigada mediante el examen de los residuos. Los residuos, que son las diferencias entre la respuesta observada y la predicha, se examinaron utilizando gráficas de probabilidad normal. Si un modelo es adecuado, los puntos en las gráficas de probabilidad normal de los residuos deben formar una línea recta (Montgomery, 2018). Al respecto, en las Figuras 2a y 2b se muestra para la temperatura de corte y la rugosidad superficial, respectivamente, que los residuos no revelan ninguna tendencia particular y que los errores se distribuyen normalmente.

**Figura 2.** Probabilidad normal de los residuos: a) para la temperatura de corte, b) para la rugosidad de la superficie.

En cuanto a los efectos principales de los parámetros de mecanizado en la rugosidad superficial y la temperatura de corte, se observa que la velocidad de avance tuvo un mayor efecto sobre la rugosidad superficial (Figura 3a). Los resultados de la velocidad de avance también estuvieron en correspondencia con los estudios de Sahu

et al. (2014), Pal *et al.* (2014), Das *et al.* (2017), Branco *et al.* (2018), y Arsene *et al.* (2021), quienes observaron que el avance tuvo un mayor efecto en la rugosidad superficial. Adicionalmente, Suresh *et al.* (2012) observó un mayor efecto del avance a valores menores de velocidad de corte.

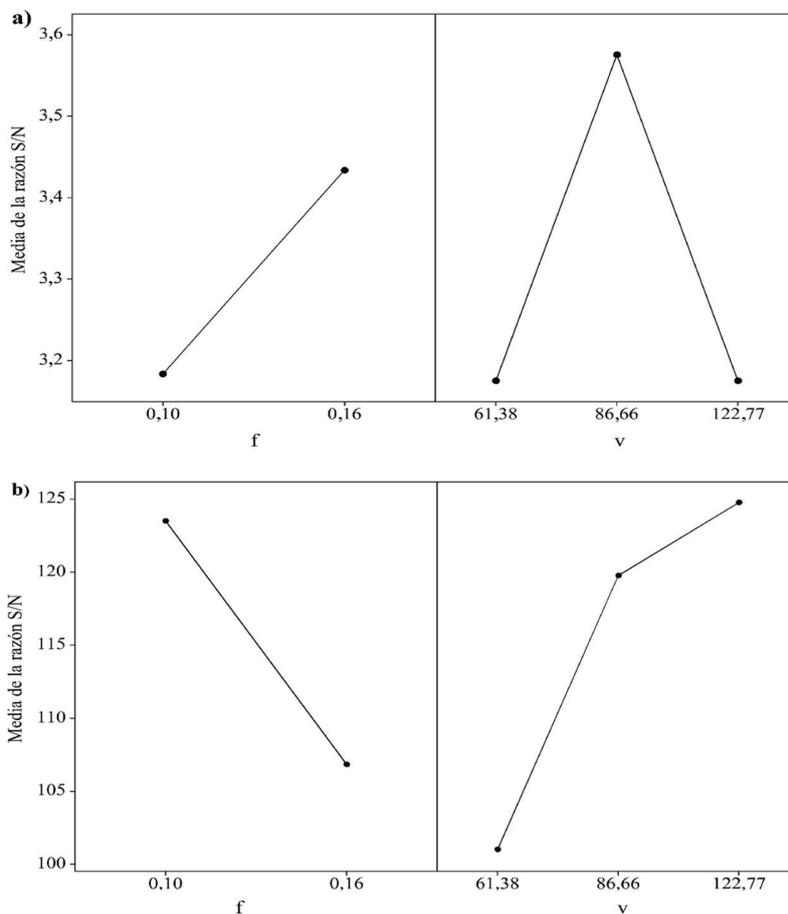


Figura 3. Efectos principales del avance y la velocidad de corte en: a) la rugosidad superficial, b) la temperatura de corte. El eje X indica el valor de cada parámetro de corte (f, v) en dos y tres niveles, respectivamente, y el eje Y la variable respuesta.

En este estudio también se observó que la rugosidad superficial crece (valores superiores a $3,4 \mu\text{m}$) a medida que aumenta el avance hasta $0,16 \text{ mm/r}$ (Figura 3a), coincidiendo con lo reportado por Abrão y Aspinwall (1996), Suresh *et al.* (2012), y Arsene *et al.* (2021). En el presente trabajo, los valores de rugosidad superficial obtenidos después del torneado duro en seco del acero AISI 4140, en una máquina herramienta convencional con herramientas de carburo recubiertas, alcanzaron valores mínimos de $1,6 \mu\text{m}$, por lo que se podría sustituir la operación de rectificado considerando este valor, así como de otras ventajas desde los puntos de vistas técnicos, económicas y ambientales (Suresh *et al.*, 2012; Sahu *et al.*, 2014; Khan y Bhivsane, 2018; Das *et al.*, 2018; Abbas *et al.*, 2022).

Al estudiar la temperatura de corte se observó que la velocidad de corte mostró un mayor efecto que el avance sobre esta variable (Figura 3b), coincidiendo con lo reportado por Chinchankar y Choudhury (2014), y Pal *et al.* (2014). Se observó adicionalmente un crecimiento de la temperatura a $125 \text{ }^\circ\text{C}$ al aumentar la velocidad de corte a $122,77 \text{ m/min}$, lo que coincide con lo obtenido por Chinchankar y Choudhury (2014), Pal *et al.* (2014), Mia y Dhar (2016), Das *et al.* (2017), y Kumar *et al.* (2018). En el caso de Mia y Dhar (2016), utilizaron parámetros de corte cercanos a los del presente estudio, aunque el material de la pieza fue un acero al carbono endurecido AISI 1060, mientras que Das *et al.* (2017) aplicaron parámetros de corte y condiciones de elaboración similares a la presente investigación; sin embargo, Kumar *et al.* (2018) emplearon como material de elaboración el acero para herramientas

endurecido AISI D2 Todo lo anterior corrobora lo complejo de los procesos de maquinado por arranque de virutas y del gran número de variables de que depende (Astakhov, 2006a; Grzesik, 2008; Astakhov, 2011; Shihab *et al.*, 2014; Morales *et al.*, 2014). En resumen, los parámetros de mecanizado óptimos para minimizar la temperatura de corte y la rugosidad superficial fueron los valores más bajos de avance (0,10 mm/r) y velocidad de corte (61,38 m/min) (Figuras 3a y 3b).

Conclusiones

El aumento en la velocidad de corte durante el torneado duro en seco de acero AISI 4140 provocó un aumento en la temperatura de la zona de corte; sin embargo, el avance no presentó un efecto estadísticamente significativo ($P > 0,05$). El aumento del avance provocó un crecimiento de la rugosidad superficial de la pieza mecanizada y fue un factor estadísticamente significativo ($P < 0,05$); mientras que, el efecto de la velocidad de corte no fue significativo ($P > 0,05$). Los valores de rugosidad superficial obtenidos después del torneado duro variaron en un rango aceptable, por lo que se podría reemplazar la operación de rectificado, en virtud de: reducir el tiempo de mecanizado, el impacto medioambiental y en la salud de los operarios, el consumo de energía y los costes de fabricación. Los parámetros de mecanizado óptimos para minimizar simultáneamente la temperatura de corte y la rugosidad superficial fueron los valores más bajos de avance y velocidad de corte.

Referencias Bibliográficas

- Abbas, A. T., Al-Abduljabbar, A. A., Alnaser, I. A., Aly, M. F., Abdelgaliel, I. H., Elkaseer, A. (2022). A closer look at precision hard turning of AISI 4340: multi-objective optimization for simultaneous low surface roughness and high productivity. *Materials*, 15(6), 2106.
- Abbas, A. T., Anwar, S., Hegab, H., Benyahia, F., Ali, H., Elkaseer, A. (2020a). Comparative evaluation of surface quality, tool wear, and specific cutting energy for wiper and conventional carbide inserts in hard turning of AISI 4340 alloy steel. *Materials*, 13, 5233.
- Abbas, A. T., El Rayes, M. M., Luqman, M., Naeim, N., Hegab, H., Elkaseer, A. (2020b). On the assessment of surface quality and productivity aspects in precision hard turning of AISI 4340 steel alloy: relative performance of wiper vs. conventional inserts. *Materials*, 13, 2036.
- Abrão, A. M., Aspinwall, D. K. (1996). The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel. *Wear*, 196, 279-284.
- Arsene, B., Gheorghe, C., Sarbu, F. A., Barbu, M., Cioca, L. I., Calefariu, G. (2021). MQL-assisted hard turning of AISI D2 steel with corn oil: analysis of surface roughness, tool wear, and manufacturing costs. *Metals*, 11, 2058.
- Arshinov, V., Alekseev, G. (1970). *Metal cutting theory and cutting tool design*. Moscú: Editorial Mir.
- Astakhov, V. P. (2004). The assessment of cutting tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 637-647.
- Astakhov, V. P. (2006a). Effects of the cutting feed, depth of cut, and workpiece (bore) diameter on the tool wear rate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34, 631-640.
- Astakhov, V. P. (2006b). *Tribology of metal cutting*. 1st ed. London: Elsevier Ltd.
- Astakhov, V. P. (2011). Machining of hard materials – definitions and industrial applications. In: *Machining of Hard Materials*. Ed. Davim, J. P. 1st ed. London: Springer, 1-32.
- Boothroyd, G., Knight, W. A. (2006). *Fundamentals of machining and machine tools*. Boca Raton: CRC Press.
- Branco, F. K., Delijaicov, S., Bordinassi, É. C., Bortolussi, R. (2018). Surface integrity analysis in the hard turning of cemented steel AISI 4317. *Materials Research*, 21(05), e20171032.

Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A. G., Hermann, C. (2015). Metalworking fluids mechanisms and performance, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, 605-628.

Brinksmeier, E., Meyer, E., Huesmann-Cordes, A. G., Hermann, C. (2015). Metalworking fluids mechanisms and performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, 605-628.

Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2014). Applications and processing of metal Alloys. In: *Materials science and engineering: an introduction*. 9th ed. New York: John Wiley & Sons, 391-449.

Carou, D. (2013). *Estudio experimental para determinar la influencia de la refrigeración/lubricación en la rugosidad superficial en el torneado intermitente a baja velocidad de piezas de magnesio*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Chinchankar, S., Choudhury, S. K. (2014). Evaluation of chip-tool interface temperature: effect of tool coating and cutting parameters during turning hardened AISI 4340 steel. *Procedia Materials Science*, 6, 996-1005.

Çolak, O., Kurbanoglu, C., Kayacan, M. C. (2007). Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. *Materials and Design*, 28(2), 657-666.

Das, R. K., Sahoo, A. K., Mishra, P. C., Kumar, R., Panda, A. (2018). Comparative machinability performance of heat treated 4340 steel under dry and minimum quantity lubrication surroundings. *Procedia Manufacturing*, 20, 377-385.

Das, S. R., Panda, A., Dhupal, D. (2017). Experimental investigation of surface roughness, flank wear, chip morphology and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with coated carbide insert. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 3(9), 1-14.

Dhar, N., Kamruzzaman, M., Ahmed, M. (2006). Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 299-304.

Erdel, B. P. (2003). *High-Speed Machining*, Society of Manufacturing Engineers. Michigan: Dearborn.

Llanes, E. A., Falcon, E. B. (2019). *Incidencia de la velocidad de avance, profundidad de corte y velocidad de husillo en la rugosidad superficial para puntas de ejes de vehiculos*. Tesis de Maestría. Quito: Universidad Internacional SEK.

Fitzpatrick, M. (2014). Single-purpose measuring tools, gages, and surface roughness. In: *Machining and CNC technology*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 182-218.

Gosai, M., Bhavsar, S. N. (2016). Experimental study on temperature measurement in turning operation of hardened steel (EN36). *Procedia Technology*, 23, 311-318.

Groover, M. P. (2013). Material properties and product attributes. In: *Fundamentals of modern Manufacturing*. 5th ed. New York: John Wiley & Sons.

Grzesik, W. (2008). Machining of hard materials. In: *Machining. fundamentals and recent advances*. Ed. Davim, J. P. 1st ed. London: Springer, 97-126.

Grzesik, W. (2017). Heat in metal cutting. In: *Advanced machining processes of metallic materials*. 2nd ed. London: Elsevier, 163-182.

Grzesik, W. (2018). Prediction of surface topography in precision hard machining based on modelling of the generation mechanisms resulting from a variable feed rate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 4115-4123.

Gunjal, S. U., Patil, N. G. (2018). Experimental investigations into turning of hardened AISI 4340 steel using vegetable based cutting fluids under minimum quantity lubrication. *Procedia Manufacturing*, 20, 18-23.

Hasbrouck, C. R., Hankey, A. S., Abrahams, R., Lynch, P. C. (2020). Sub-surface microstructural evolution and chip formation during turning of AF 9628 steel. *Procedia Manufacturing*, 48, 559-569.

- Iqbal, A., Zhao, G., Cheok, Q., He, N., Nauman, M. (2022). Sustainable machining: tool life criterion based on work surface quality. *Processes*, 10(6), 1087.
- Kant, G. (2016). *Prediction and optimization of machining parameters for minimizing surface roughness and power consumption during turning of AISI 1045 steel*. Tesis doctoral. Pilani: Birla Institute of Technology & Science.
- Khan, P. L., Bhivane, S. V. (2018). Experimental analysis and investigation of machining parameters in finish hard turning of AISI 4340 steel. *Procedia Manufacturing*, 20, 265-270.
- Kıvık, T., Samtaş, G., Çiçek, A. (2012). Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills. *Measurement*, 45(6), 1547-1557.
- Klocke, F., Brinksmeier, E., Weinert, K. (2005). Capability profile of hard cutting and grinding processes. *CIRP Annals*, 54(2), 22-45.
- König, W., Komandur, R., Tonshoff, H., Ackershott, G. (1984). Machining of hard materials. *CIRP Annals*, 33(2), 417-427.
- Kumar, R., Kumar, A., Kumar, R., Panda, A., Chandra, P. (2018). Modelling of flank wear, surface roughness and cutting temperature in sustainable hard turning of AISI D2 steel. *Procedia Manufacturing*, 20, 406-413.
- Kumar, S., Agarwal, S. (2017). Optimization of machining parameters in turning of AISI 4340 steel under cryogenic condition using Taguchi technique. *Procedia CIRP*, 63, 610-614.
- Lazoglu, I., Buyukhatipoglu, K., Kratz, H., Klocke, F. (2006). Forces and temperatures in hard turning. *Machining Science and Technology*, 2, 157-179.
- Lee, T.-H. (2007). *An experimental and theoretical investigation for the machining of hardened alloy steels*. Tesis doctoral. Seoul: Seoul National University of Technology.
- Leith, D., Raynor, P. C., Boundy, M. G., Cooper, S. J. (1996). Performance of industrial equipment to collect coolant mist. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 57(12), 1142-1148.
- Mia, M., Dhar, N. (2016). Optimization of surface roughness and cutting temperature in high-pressure coolant-assisted hard turning using Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1), 739-753.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C. (2018). *Applied statistics and probability for engineers*. 7th ed. Hoboken: Wiley.
- Morales, Y., Zambrano, P. C., Pérez, R., Ávila, R., Hernández, L. W., Zamora, Y. (2014). Estudio experimental del desgaste del flanco en el torneado en seco de alta velocidad del acero AISI 316L. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia*, 37(3), 1-8.
- Pal, A., Choudhury, S. K., Chinchani, S. (2014). Machinability assessment through experimental investigation during hard and soft turning of hardened steel. *Procedia Materials Science*, 6, 80-91.
- Roy, S., Ghosh, A. (2014). High-speed turning of AISI 4140 steel by multi-layered TiN top-coated insert with minimum quantity lubrication technology and assessment of near tool-tip temperature using infrared thermography. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228(9), 1058-1067.
- Sahu, S. K., Mishra, P. C., Orta, K., Sahoo, A. K. (2014). Performance assessment in hard turning of AISI 1015 steel under spray impingement cooling and dry environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(2), 251-265.
- Salur, E., Kuntoğlu, M., Aslan, A., Pimenov, D. Y. (2021). The effects of MQL and dry environments on tool wear, cutting temperature, and power consumption during end milling of AISI 1040 steel. *Metals*, 11(11), 1674.

Sampaio, M. A., Machado, Á. R., Laurindo, C. A. H., Torres, R. D., Amorim, F. L. (2018). Influence of minimum quantity of lubrication (MQL) when turning hardened SAE 1045 steel: a comparison with dry machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98, 959-968.

Santhosh, A. J., Tura, A. D., Jiregna, I. T., Gemechu, W. F., Ashok, N., Ponnusamy, M. (2021). Optimization of CNC turning parameters using face centred CCD approach in RSM and ANN-genetic algorithm for AISI 4340 alloy steel. *Results in Engineering*, 11, 100251.

Shaikh, A., Shinde, A., Chinchankar, S., Zagade, G., Pardeshi, S. (2021). *Comparative assessment of hard turning under dry and minimum quantity lubrication*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering and Nanomaterials (ICRAMEN 2021). Pune: IOP Publishing Ltd., 1206 012007.

Shihab, S. K., Khan, Z. A., Mohammad, A., Siddiquee, A. N. (2014). A review of turning of hard steels used in bearing and automotive applications. *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 24-49.

Şirin, S., Sarıkaya, M., Yıldırım, Ç., Kıvak, T. (2021). Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL. *Tribology International*, 153, 106673.

Suresh, R., Basavarajappa, S., Gaitonde, V., Samuel, G. L. (2012). Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 33, 75-86.

Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y. (2005). *Taguchi's quality engineering handbook*. 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons.

Editor Asociado: *Valentina Millano González*
Centro de Estudios de Corrosión de la
Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia
Maracaibo, 4001, Zulia, Venezuela
millanov@fing.luz.edu.ve



REVISTA TECNICA

DE LA
FACULTAD DE
INGENIERIA
UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

Volumen 47. Año 2024, Edición continua_____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en diciembre 2024, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia.** Maracaibo-Venezuela*

**www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org**