

Análisis de rugosidad del Acero AISI 4140 tratado térmicamente y mecanizado CNC
Surface roughness analysis of heat-Treated AISI 4140 steel and CNC machined

Mgs. Leónidas Esteban Ramírez Gangotena, Ing. Leonardo Andrés Toapanta Ramírez, Mgs. Ángel Isaac Simbaña Gallardo,
Mgs. Cristian Orlando Guilcaso Molina

APRENDIZAJE

Junio, V°4-N°1; 2023

- ✓ **Recibido:** 20/04/2023
- ✓ **Aceptado:** 18/05/2023
- ✓ **Publicado:** 30/06/2023

PAIS:

- 📍 Ecuador, Quito
- 📍 Ecuador, Quito
- 📍 Ecuador, Quito
- 📍 Ecuador, Latacunga

INSTITUCIÓN

- Universidad Politécnica Salesiana.
- Universidad Politécnica Salesiana.
- Instituto Superior Universitario Sucre.
- Universidad Técnica de Cotopaxi.

CORREO:

- ✉ lr Ramirezq@ups.edu.ec
- ✉ ltoapantar0@est.ups.edu.ec
- ✉ isimbana@tecnologicosucre.edu.ec
- ✉ cristian.guilcaso6706@utc.edu.ec

ORCID:

-  <https://orcid.org/0000-0003-2569-2974>
-  <https://orcid.org/0000-0002-9209-1135>
-  <https://orcid.org/0000-0002-3324-3071>
-  <https://orcid.org/0000-0003-4745-8951>

FORMATO DE CITA APA.

Ramírez, L. Toapanta, L. Simbaña, I. Guilcaso, C. (2023) *Análisis de rugosidad del Acero AISI 4140 tratado térmicamente y mecanizado CNC*. G-ner@ndo, V°4 (N°1), 1182 – 1202

Resumen

La rugosidad superficial del acero AISI 4140 se analizó mediante diseño de experimentos luego tratar térmicamente y mecanizar en un torno CNC las probetas. Se obtuvo una matriz de arreglo ortogonal de 16 experimentos, utilizando como factores la temperatura de austenización y el tiempo de calentamiento para el temple, avance y la profundidad de corte para el mecanizado, cada uno con dos niveles. El material se preparó según la norma ASME B46.1. Para la medición de rugosidad superficial, se utilizó un rugosímetro Mitutoyo SJ210 según la norma ISO 1302:2002. El factor más significativo en la rugosidad superficial fue la profundidad de corte, con un p valor de 0.008, mientras que, el avance tiene baja significancia. La mejor combinación de factores fue en el experimento 5, para la menor rugosidad superficial de 0.446 μm , con 800 °C y 30 minutos para el temple, así como 0.1 mm-rev-1 y 0.2 mm para el avance y la profundidad de corte en el mecanizado, respectivamente.

Palabras clave: Rugosidad Superficial, CNC, AISI 4140, Tratamiento Térmico.

Abstract

Surface roughness of heat treated and CNC turning machined AISI 4140 steel has been analyzed by design of experiments. An orthogonal array matrix of 16 experiments was obtained, considering as factors temperature and heating time for quenching, besides feed and depth of cut, each one with two levels. The preparation of the material for the experiments was according ASME B46.1 standard. To take the surface roughness measurement, a Mitutoyo SJ210 roughness meter was utilized and following the indicated procedure in ISO 1302:2002 standard. The best factors and levels combination was in the experiment 5, obtaining a surface roughness of 0.446 μm . The results indicated that the most significant factor in surface roughness was the depth of the cut, obtaining a p value of 0.008. Therefore, the best values for the machining of heat-treated AISI 4140 steel were 800 °C and 30 minutes for quenching, meanwhile for feed and depth of cut were 0.1 mm-rev-1 and 0.2 mm, respectively.

Keywords: Surface Roughness, CNC, AISI 4140, Heat Treatment.

Introducción

Introducción

Un acero AISI 4140 es utilizado comercialmente debido a su amplio campo de aplicaciones, es una aleación de acero que está entre los materiales empleados para el diseño de elementos de máquinas, como árboles de levas, engranajes y otros (Romero y Rondón, 2019). Este acero presenta una dureza superficial en estado de suministro de 29 a 34 HRC (Bohman, 2021). La Tabla 1 presenta la composición química de este acero, considerado como un acero de medio contenido de carbono.

Tabla 1

Composición química del acero AISI 4140

Elemento	Ni	Cr	Mn	C	Mo	Si	Cu
Porcentaje [%]	0.03	1	0.59	0.43	0.18	0.27	0.02

Fuente: Bilal et al. (2019)

Generalmente, se necesita elementos endurecidos mediante tratamientos térmicos, el temple para incrementar la dureza y el revenido para aliviar tensiones internas. Los tratamientos térmicos buscan aumentar la dureza de un acero y también mejorar su ductilidad, sin embargo, los valores de estas propiedades se ven afectados por las temperaturas de calentamiento (Dittrich et al., 2019). El tratamiento térmico de temple se caracteriza porque proporciona constituyentes duros y estables a temperatura ambiente, como martensita, sorbita, troostita y vainita (Salán Ballesteros, 2005). Es necesario calentar el acero hasta 50 °C por encima de la temperatura de austenización, luego de haber permanecido un tiempo suficiente, se enfría rápidamente. Si la velocidad de enfriamiento es superior a la velocidad crítica de temple, se obtiene una microestructura totalmente martensítica, mientras que una velocidad inferior a la

velocidad crítica de temple conduce a microestructuras mixtas de martensita y otros constituyentes (Kalpakjian & Schmid, 2002).

El Control Numérico Computarizado (CNC) se caracteriza por dirigir el posicionamiento en diferentes planos para maquinar una pieza a través de órdenes con un determinado lenguaje de programación. El código G es conocido como el lenguaje de programación más usado para control numérico (Pozo-Safla et al., 2018). El mecanizado en torno CNC es necesario para incrementar la productividad, ya que es de 5 a 10 veces superior que un proceso convencional. Las ventajas principales son las bajas fuerzas y temperaturas generadas, además de obtener mayor exactitud en las medidas y mejorar el acabado superficial (Saini y Panchal, 2017). Una alta rugosidad superficial en elementos de máquina reduce la resistencia a la fatiga debido a la concentración de esfuerzos en las zonas de mayores irregularidades, ocasionando que la pieza falle tempranamente (Siddiqui & Thakur, 2019). El acabado superficial de un material consiste en desviaciones repetitivas y aleatorias con respecto a la superficie nominal de un objeto. La rugosidad se refiere a pequeñas desviaciones, finamente espaciadas, con respecto a la superficie nominal, que son influenciadas por las características del material, y del proceso de fabricación que formaron la superficie (Aldana y Pereira, 2011)

Para el análisis de la significancia que tienen los parámetros y la variación de sus valores, se utiliza técnicas estadísticas sistemáticas con el propósito de desarrollar un conjunto de ensayos, modificando las variables con valores definidos. Los resultados permiten considerar si estos parámetros influyen en la variable respuesta, además, si existe influencia de algún factor en el proceso, determinar este valor de significancia (Montgomery, 2008). Diferentes investigaciones han realizado análisis estadísticos del

proceso de mecanizado, además de considerar otras variables. Los estudios utilizando acero AISI 4140 como material mecanizado en CNC se resumen a continuación. El efecto de los tratamientos térmicos en la corrosión mecánica y electroquímica del acero AISI 4140 fue analizada por Hafeez y Farooq (2019). Los experimentos se realizaron calentando el acero a 900 °C durante 30 minutos para realizar el temple en aceite y finalizar con un revenido a 400 °C por 120 minutos. La microestructura fue analizada con un microscopio electrónico, mientras que las propiedades mecánicas fueron evaluadas con ensayos Charpy, de tracción y con la medición de dureza superficial. La dureza superficial del acero incrementa ligeramente, mientras que las propiedades mecánicas si aumentan, principalmente, la resistencia a la tracción, pasando de 782.65 a 1582.65 MPa en estado de suministro y tratado térmicamente, respectivamente.

Kaiser et al. (2020) investigaron el proceso de temple y revenido a inducción en corto tiempo del acero AISI 4140 para compararlo con un modelado de elementos finitos. El desarrollo experimental consistió en simulación electromagnética, térmica, mecánica y metalúrgica para endurecimiento por temple seguido de un revenido por inducción. La temperatura de calentamiento fue de 1050 °C, consiguiendo una diferencia de dureza superficial de aproximadamente 65 HRB entre valores experimental y simulado. La resistencia a la tracción es muy similar en los dos procedimientos hasta llegar a la zona plástica, donde el calor experimental llegó a 900 MPa y la simulación alcanzó 1100 MPa. Los experimentos mostraron una disminución de esfuerzos residuales, además de un incremento de dureza superficial que conlleva a un endurecimiento y mayor fragilidad, por lo que el revenido permitió disminuir estos esfuerzos. La optimización y evaluación de los métodos de mecanizado en seco y con la mínima cantidad de lubricación del acero

AISI 4140 utilizando Taguchi y Anova fue presentado por Gurbuz y Gonulacar (2020). Mediante una matriz ortogonal, se definió 18 experimentos, con tres factores, las condiciones de corte, la velocidad de corte y avance, cada uno con tres niveles. La variable de mayor significancia en la rugosidad superficial fue el avance, con un 93.976 %, mientras que los parámetros óptimos sugeridos por los autores son $0.16 \text{ mm}\cdot\text{rev}^{-1}$ y $125 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ para el avance y velocidad de corte, utilizando mínima cantidad de lubricación.

Ruiz y Sarmiento (2021) investigaron el acabado superficial que se vio reflejado en la rugosidad de superficies mecanizadas. Para mejorar el acabado superficial se busca minimizarla, entonces el objetivo de los autores fue evaluar la rugosidad superficial en el proceso de torneado de un acero AISI 4140 para verificar la calidad de las piezas torneadas, seleccionándose para ello el inserto, la velocidad de avance, profundidad de corte y velocidad de husillo adecuada para medir la rugosidad superficial media. Para la ejecución de los ensayos, se utilizó un rugosímetro digital aplicándose técnicas de diseño de experimentos, parámetros de operación y rugosidad, típicos en la práctica industrial. El resultado de la rugosidad media (R_a) fue de $1.233 \mu\text{m}$ y se encuentra dentro del rango establecido por la norma ISO 1302:2002, utilizándose para ello un inserto DNMG 110408 EN – MA, velocidad de husillo $645 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, velocidad de avance $0.2 \text{ mm}\cdot\text{rev}^{-1}$ y profundidad de corte 1.0 mm . La comparación de insertos cerámicos con recubrimiento convencional y eléctricamente depositado en el mecanizado en torno del acero AISI 4140 fue realizado por Aouici et al. (2016). Para los experimentos, se utilizó acero AISI 4140 endurecido, con 60 HRC de dureza superficial, aproximadamente, en presentación de eje de 72 mm de diámetro. El estudio utilizó un método estadístico factorial considerando

como factores el avance, la velocidad y profundidad de corte, cada uno con tres niveles. Las fuerzas de mecanizado dependen de la profundidad de corte, así como del avance, recomendando para su mecanizado, insertos cerámicos cubiertos con nitrato de titanio. Además, el desgaste es visualmente mayor sin utilizar lubricación en el mecanizado, para todo tipo de inserto. Los parámetros sugeridos como óptimos durante el proceso fueron $150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $0.08 \text{ mm}\cdot\text{rev}^{-1}$ y 0.1 mm para la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte, respectivamente, sin considerar el tipo de inserto utilizado.

Das et al. (2015) estudiaron la rugosidad superficial y desgaste de herramienta en el acero AISI 4140 endurecido con insertos cerámicos. El acero fue preparado para los experimentos en un eje de diámetro 45 mm y una longitud de 120 mm. El material fue tratado térmicamente y se llegó a obtener una dureza superficial de 52 HRC, en promedio. Se utilizó un diseño factorial completo, complementado con un análisis Anova, obteniendo que el avance es el parámetro más significativo sobre la rugosidad superficial, con 92.92 %. Es importante mencionar que, a pesar del desgaste de la herramienta de corte en los ensayos, la rugosidad superficial máxima obtenida fue de $1.6 \mu\text{m}$. La optimización de los parámetros en el proceso de torneado para la remoción de material del acero AISI 4140 con el método Taguchi fue presentada por Siddique et al. (2017). Para los experimentos, se utilizaron tres factores, la velocidad rotacional, el avance y la profundidad de corte, cada uno con tres niveles, obteniendo una matriz con 27 experimentos. El avance es el factor que tiene mayor significancia en la remoción del material, con 61.02 %, seguido por la profundidad de corte con 16.48 %. Los parámetros para optimizar el mecanizado fueron $2100 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, $0.3 \text{ mm}\cdot\text{rev}^{-1}$ y 0.6 mm para la velocidad rotacional, avance y profundidad de corte, respectivamente.

Mohd et al. (2020) presentaron la optimización de la rugosidad superficial y desgaste de herramienta en el acero AISI 4140 utilizando insertos con recubrimiento Ni-YSZ en el proceso de torneado CNC. El diseño consistió en 20 experimentos utilizando insertos sin recubrimiento y con el recubrimiento en mención. El mejor acabado superficial con una rugosidad de $0.28 \mu\text{m}$ se obtuvo con el inserto con recubrimiento Ni-YSZa $210 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $0.08 \text{ min}\cdot\text{rev}^{-1}$ y 0.1 mm para la velocidad de corte, avance y profundidad de corte, respectivamente. El efecto de los parámetros de corte en la rugosidad superficial mediante el método Taguchi al mecanizar el acero AISI 4140 fue investigado por Lynen et al. (2020). El diseño factorial utilizó tres factores, la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte, a tres diferentes niveles. El análisis permitió afirmar que el avance es la variable de mayor significancia sobre la rugosidad superficial, teniendo el 99.34 % de influencia. Por lo que los autores recomiendan utilizar un avance de $0.08 \text{ mm}\cdot\text{rev}^{-1}$ con cualquier combinación de los factores restantes. La relación entre el valor de rugosidad superficial obtenido de forma experimental y el estimado mediante un modelamiento de regresión lineal presenta una convergencia del 96 %.

Por lo que, al considerar la información presentada, el objetivo de esta investigación es definir parámetros adecuados para el mecanizado en torno CNC del acero AISI 4140 tratado térmicamente. El acabado superficial es medido considerando la rugosidad superficial media de una pieza mecanizada. Por lo que, mediante un análisis estadístico en base a diseño de experimentos, se defina los parámetros de mecanizado que generen la menor rugosidad superficial. Este documento se encuentra distribuido de la siguiente manera, en Materiales y Métodos se describe los procedimientos realizados para la ejecución de los experimentos y mediciones. Los Resultados muestran el análisis

estadístico de las mediciones para, finalmente, presentar Conclusiones que den a conocer la importancia de la investigación y brinden una propuesta a los objetivos planteados.

Materiales Y Métodos

La variable en estudio fue la rugosidad superficial, dependiente de otras variables, consideradas como factores a analizar. Estos factores fueron la temperatura y tiempo de calentamiento para el temple indicadas por el fabricante, además del avance y profundidad de corte. Los niveles fueron 800 y 850 °C, 20 y 30 minutos, 0.1 y 0.3 mm·rev⁻¹ (Bohman, 2021), 0.2 y 0.9 mm (Tools United, 2020), para cada factor, respectivamente. Se definió a la rugosidad superficial como variable de respuesta. Mediante un diseño factorial considerando los factores y niveles, se estableció una matriz de arreglo ortogonal con 16 experimentos utilizando software especializado. Se procedió a realizar el mecanizado CNC para posteriormente realizar las mediciones de rugosidad superficial en cada experimento. La Tabla 2 resume la distribución de los factores y niveles considerados para plantear el análisis estadístico. Mediante un software especializado, se obtuvo una matriz de arreglo ortogonal de 16 experimentos para los factores y niveles definidos.

Tabla 2

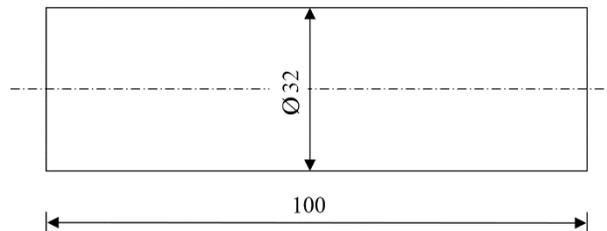
Factores y niveles experimentales

FACTORES	NIVELES	
Temperatura de temple [°C]	800	850
Tiempo de temple [min]	20	30
Avance [mm·rev ⁻¹]	0.1	0.2
Profundidad de corte [mm]	0.2	0.9

Para realizar cada experimento, se utilizó un eje de acero AISI 4140 con las dimensiones que se indican en la Figura 1, con medidas en mm, según lo indicado en la norma ASME B46.1 (ASME, 2010).

Figura 1

Dimensiones de las probetas para cada experimento



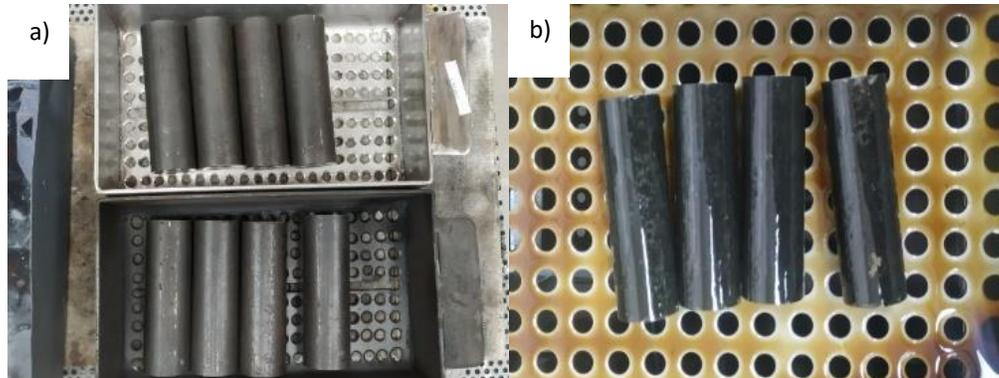
Para realizar el temple, se requirió calentar el acero a la temperatura de austenización, acorde al fabricante (Bohman, 2021), entre 800 a 850 °C. Para enfriamiento en aceite, el tiempo de mantenimiento en minutos cuando ha alcanzado la temperatura de temple es 0.7 multiplicado por el espesor o diámetro en milímetros (Bohman, 2021), Entonces, al utilizar un eje de acero AISI 4140 de 30 mm de diámetro, se ha considerado valores superiores e inferiores al determinado, teniendo 20 y 30 minutos. El temple se realizó en aceite para tratamientos térmicos a temperatura ambiente, sumergiendo inmediatamente después de retirar del horno para enfriar rápidamente. El temple incrementa la dureza superficial permitiendo alcanzar 56 HRC, propiedad mecánica vinculada a una mayor fragilidad del acero debido a tensiones internas. La Figura 2 presenta el procedimiento para realizar el temple, en primer lugar, colocando el acero para calentarlo hasta la temperatura de austenización, para luego realizar el enfriamiento súbito utilizando aceite térmico para templar el acero.

Se utilizó un torno CNC EMCOMAT modelo E-200, con una distancia entre puntos de 1000 mm y un diámetro máximo de 400 mm para el mecanizado. Cuenta con un motor

trifásico de 7.5 kW pudiendo generar un torque máximo de 180 N·m y control de velocidad de 50 a 5000 rpm. La herramienta utilizada para el montaje de inserto fue de tipo SCLCR 2020K 09 compatible con el portaherramientas del torno en mención.

Figura 2

Etapa de temple, a) antes del tratamiento, b) después del tratamiento



Para el mecanizado, se utilizó insertos DCMT11T304 de carburo de tungsteno con recubrimiento cerámico por deposición química (CVD, por sus siglas en inglés) como se muestra en la Figura 3. El radio de punta y la longitud útil cortante de los insertos son 0.39 y 11.22 mm, respectivamente. Para realizar el proceso de mecanizado, se requirió utilizar un filo nuevo para cada experimento, por lo que fue necesario utilizar 8 insertos.

Figura 3

Insertos DCMT11T304



Fuente: Tools United (2020)

Para la desarrollar el mecanizado en los experimentos, se ha considerado investigaciones como Mohd et al. (2020) y Schwalm et al. (2020). Son trabajos donde se

ha analizado la rugosidad superficial del acero AISI 4140 conjuntamente con el desgaste de la herramienta de corte. En estas investigaciones, se recomienda utilizar un filo cortante para cada experimento. Además, el valor de profundidad de corte no debe modificarse. Entonces, se realizó el mecanizado en torno CNC con una pasada de 0.9 mm para los experimentos con esta profundidad. Mientras que, para los experimentos en los que se definió una profundidad de 0.2 mm, se realizaron cinco pasadas a lo largo de la longitud definida. La Figura 4 indica la codificación necesaria para realizar el mecanizado en el torno CNC. Además, el procedimiento automático para realizar el cilindrado en la longitud establecida.

Figura 4
Programación y mecanizado CNC



Las normas INEN-ISO 4287:1997 (2014) e ISO 1302:2002 (2002) fueron consideradas para la evaluación geométrica y parámetros de calidad superficial de productos. Las normas establecen que, el análisis requiere cinco mediciones longitudinales para promediarlas y utilizar este valor. Para la toma de medidas experimentales de rugosidad superficial, se utilizó un rugosímetro modelo SJ 210 de la marca Mitutoyo, de tipo digital con rango mínimo / resolución de 25 / 0.002 μm con rango de medición de 17.5 mm. Este rugosímetro permitió obtener el valor de rugosidad

superficial media (Ra) mediante perfiles evaluando irregularidades micrométricas presentes después del mecanizado. La Figura 5 indica el proceso realizado para la toma de mediciones longitudinales de rugosidad superficial.

Figura 5

Medición experimental de rugosidad superficial



Análisis de Resultados

El material fue testeado con medición de dureza en estado de suministro, con valores entre 30.7 a 32.5 HRC. El valor indicado por el fabricante es de 328 HRB, equivalente a 34 HRC, con error relativo del 7 % entre los valores experimental y suministrado. La Tabla 4 presenta el análisis comparativo entre los resultados obtenidos en el ensayo de espectrofotometría y los porcentajes indicados por el fabricante. El error relativo no ha superado el 1 % en diferencia de los porcentajes de cada elemento, mientras que el Mn presentó una diferencia del 27 %, debido al proceso de bonificado. Al analizar los valores de dureza superficial y la concordancia del análisis de composición química, se afirma que el acero suministrado corresponde al acero AISI 4140.

Tabla 4

Comparativa de la composición del AISI 4140

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Mo
----------	---	----	----	----	----

Suministro [%]	0.42	0.81	0.30	1.13	0.23
Experimental [%]	0.40	1.03	0.28	1.16	0.22

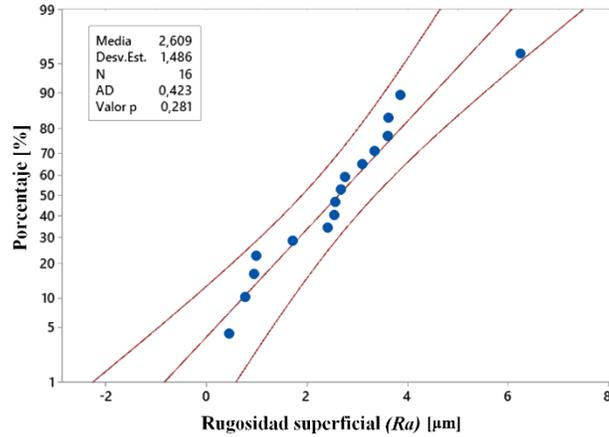
La Tabla 5 muestra la matriz de arreglo ortogonal con el valor promedio obtenido de las medidas experimentales de rugosidad superficial.

Tabla 5
Rugosidad superficial media de los experimentos

Experimento	Temperatura de temple [°C]	Tiempo temple [min]	Avance [mm·rev ⁻¹]	Profundidad de corte [mm]	Rugosidad [μm]
1	800	20	0.1	0.2	0.934
2	800	20	0.1	0.9	3.866
3	800	20	0.2	0.2	2.763
4	800	20	0.2	0.9	1.727
5	800	30	0.1	0.2	0.449
6	800	30	0.1	0.9	3.629
7	800	30	0.2	0.2	2.404
8	800	30	0.2	0.9	6.401
9	850	20	0.1	0.2	0.767
10	850	20	0.1	0.9	3.107
11	850	20	0.2	0.2	2.571
12	850	20	0.2	0.9	3.602
13	850	30	0.1	0.2	0.988
14	850	30	0.1	0.9	3.331
15	850	30	0.2	0.2	2.536
16	850	30	0.2	0.9	2.675

Previo al análisis de las mediciones experimentales obtenidas, se requiere validar estos valores, por lo que se desarrolló una prueba de normalidad con un intervalo de confianza del 95 %. La Figura 7 indica la distribución de estas mediciones evaluando con respecto a una curva normal. Se puede evidenciar que todos los valores seleccionados para el análisis siguen una normalidad, siendo válidos para continuar con el análisis.

Figura 7
Normalidad de las mediciones de rugosidad superficial



La Tabla 6 resume el análisis de varianza presentado, con el propósito de evaluar la diferencia de varianzas en los experimentos con la variación de factores y niveles entre ellos. Este análisis ha considerado el test de la F de Fisher y el p valor, donde se afirma que todo factor que sea inferior a 0.05 para este último, va a influir significativamente sobre la rugosidad [26]. El factor de mayor influencia fue la profundidad de corte, mientras que el avance tiene una significancia mucho menor. Además, es importante mencionar que, la variación en los parámetros de temple no presenta una significancia sobre la rugosidad superficial después del mecanizado.

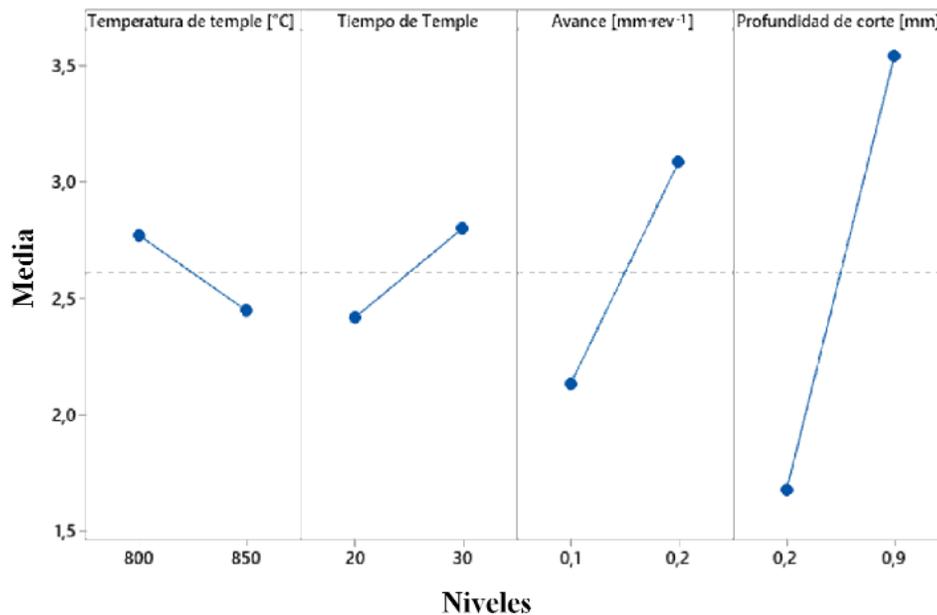
Tabla 6
Resumen ANOVA

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Lineal	4	18.5543	4.6386	3.51	0.044
Temperatura temple [°C]	1	0.4212	0.4212	0.32	0.584
Tiempo de temple [min]	1	0.5914	0.5914	0.45	0.517
Avance [mm·rev ⁻¹]	1	3.6176	3.6176	2.74	0.126
Profundidad de corte [mm]	1	13.9241	13.9241	10.53	0.008
Error	11	14.5474	1.3225		
Total	15	33.1017			

La Figura 8 presenta los efectos principales entre factores y niveles analizados, esquematizando la diferencia entre los promedios de cada factor. Un efecto principal es

considerado cuando se presentan varios niveles en un factor que influyen de manera significativa en la respuesta. El factor de profundidad de corte tiene mayor significancia, al presentar una mayor diferencia entre los valores analizados con respecto a la media.

Figura 8
Efectos principales en la rugosidad superficial



Conclusiones

El análisis de la rugosidad superficial del acero AISI 4140 tratado térmicamente y mecanizado en torno CNC fue desarrollado. El acero AISI 4140 es un acero aleado utilizado para la fabricación de elementos de máquina sometidos a desgaste. Se utilizan procedimientos manuales y automatizados para su manufactura y a pesar de tener una dureza superficial en promedio de 33 HRC, se requiere realizar tratamientos térmicos para incrementar este valor. Un tratamiento térmico conlleva dilatación del acero y puede involucrar adición de material, por lo que, un elemento previamente mecanizado puede perder su tolerancia dimensional. Entonces, es importante analizar si es viable realizar

el mecanizado de los materiales tratados térmicamente, sin comprometer la vida útil de máquinas y herramientas, además de obtener excelentes acabados superficiales.

Para el diseño de experimentos, se consideró la temperatura y tiempo de calentamiento de austenización para luego realizar el temple. Estos valores fueron definidos según la hoja técnica proporcionada por el fabricante, entre 800 a 850 °C para la temperatura y 20 y 30 minutos para el tiempo. Para el mecanizado CNC, se adquirió insertos DCMT11T304 con recubrimiento cerámico, también considerando las indicaciones del fabricante, valores mínimos y máximos de 0.1 y 0.2 mm·rev⁻¹ y 0.2 y 0.9 mm para el avance y profundidad de corte, respectivamente. Entonces, con la combinación de estos cuatro factores, cada uno con dos niveles, se generó una matriz de 16 experimentos. Se inició con el desarrollo de los tratamientos térmicos, para luego seguir con el mecanizado en torno CNC y finalmente tomar las mediciones de rugosidad superficial.

El análisis de resultados fue desarrollado al plantear un análisis de varianza, con el propósito de evaluar la diferencia de varianzas en los experimentos con la variación de factores y niveles entre ellos. Se planteó un intervalo de confianza del 95 %, por lo cual, se consideró como significativos a los factores con un p valor menor a 0.05. Las mediciones experimentales siguiendo una normalidad, por lo que se puede afirmar que, estos resultados pueden ser utilizados para el análisis. Se definió que, la profundidad de corte es el único factor que tiene significancia en la rugosidad superficial de los factores planteados. Tuvo un p valor de 0.008 y fue el factor que mayor diferencia tuvo al analizar los efectos estandarizados. Los factores que intervienen en el temple, como fueron la

temperatura y tiempo no son significantes en la rugosidad superficial con la combinación de factores y niveles definidos para este análisis.

El experimento 5 permitió conseguir el mejor acabado superficial con la menor rugosidad, teniendo un valor de $0.449 \mu\text{m}$. Por lo que, una menor rugosidad superficial se obtiene con una menor dureza superficial, al considerar una temperatura de austenización de $800 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 minutos. Además, el avance y profundidad de corte son directamente proporcionales a la rugosidad superficial, con los valores inferiores de $0.2 \text{ mm}\cdot\text{rev}^{-1}$ y 0.2 mm para el avance y profundidad de corte, se obtuvo el mejor acabado superficial.

Referencias bibliográfica

- Aldana, L., y Pereira, J. (2011). *Evaluación de la rugosidad superficial en el fresado CNC de moldes en acero AISI H13*. Naguanagua: Universidad de Carabobo. Retrieved 10 de Octubre de 2022, from <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/6475/laldana.pdf?sequence=1>
- Aouici, H., Elbah, M., Yallese, M., Fnides, B., Meddour, I., y Benlahmidi, S. (2016). Performance comparison of wiper and conventional ceramic inserts in hard turning of AISI 4140 steel: analysis of machining forces and flank wear. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, 5-8.
- ASME. (2010). *ASME B46.1 - Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. Retrieved 2 de Enero de 2023, from <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b46-1-surface-texture>
- Bilal, M., Yaqoob, K., Zahid, M., Ehsan, U., Tanveer, W., Wadood, A., y Ahmed, B. (2019). Effect of austempering conditions on microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 5194-5200.
- Bohman, I. (2021). *Ficha Técnica IBCA 709*. Retrieved 06 de Octubre de 2022, from <https://studylib.es/doc/6528862/ficha-t%C3%A9cnica---ivan-bohman-ca>
- Das, S., Dhupal, D., y Kumar, A. (2015). Study of surface roughness and flank wear in hard turning of AISI 4140 steel with coated ceramic inserts. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(10), 4329-4340.
- Dittrich, F., Kaars, J., Masek, B., Jenicek, S., Wagner, M., y Mayr, P. (2019). HAZ characterization of welded 42SiCr steel treated by quenching and partitioning. *Journal of Materials Processing Tech.*, 268, 37-46.
- Gurbuz, H., y Gonulacar, Y. (2020). Optimization and evaluation of dry and minimum quantity lubricating methods on machinability of AISI 4140 using Taguchi design and ANOVA. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 0, 1-17.
- Hafeez, M., y Farooq, A. (2019). Effect of Heat Treatments on the Mechanical and Electrochemical Corrosion Behavior of 38CrSi and AISI 4140 Steels. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 8, 479–487.
-

- INEN. (2002). *ISO 1302:2002 - Especificación geométrica de productos (GPS). Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos*. Retrieved 02 de Enero de 2023, from https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_iso_1302.pdf
- INEN. (2014). *INEN 4287:1997 Especificación Geométrica de Productos, Calidad Superficial: Método del Perfil. Términos, Definiciones y Parámetros de Calidad Superficial*. Retrieved 07 de Noviembre de 2022, from https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_iso_4287.pdf
- Iynen, O., Sahinoglu, A., Ozdemir, M., y Yilmaz, V. (2020). Investigation of the Effect of Cutting Parameters on the Surface Roughness Value in the Machining of AISI 4140 Steel with Taquchi Method. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2840-2849.
- Kaiser, D., Damon, J., Muhl, F., Graaff, B., Kiefer, D., Dietrich, S., y Schulze, V. (2020). Experimental investigation and finite-element modeling of the short-time induction quench-and-temper process of AISI 41. *Journal of Materials Processing Tech.*, 279, 116485.
- Kalpakjian, S., y Schmid, S. (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación.
- Mohd, A., Adnan, M., Baba, N., Selamat, Z., Rose, A., y Mohamed, S. (2020). Optimization of surface roughness and tool wear on AISI 4140 using coated Ni-YSZ for CNC turning process . *Journal of Physics: Conference Series*, 1-11, 012001.
- Montgomery, D. (2008). *Diseño y Análisis de Experimentos*. México: Limusa.
- Pozo-Safla, E., Aquino-Arroba, S., y Ordoñez-Viñan, M. (2018). Ampliación de la realidad virtual en el mecanizado mediante torno CNC de un peón de ajedrez. *Polo de Conocimiento*, 6(5), 1234-1258.
- Romero, J., y Rondón, E. (2019). Rolling friction of AISI 4140 steel in a ring on ring tribometer. *Revista Ingeniería UC*, 26(2), 185-191.
- Ruiz, A., y Sarmiento, W. (2021). *Estudio de la rugosidad superficial en el proceso de torneado basado en las normas ISO 1302 de un acero AISI 4140 para verificar la calidad*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. Retrieved 11 de Octubre de
-

- 2022, from http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/16465/Ruiz_Coaquira_Alber.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Saini, N., y Panchal, J. (2017). Taguchi Based Grey Relational Analyses for Multi Objective Optimization of Response Variables in CNC Turning of Aluminum 7075 Alloy. *International Journal of Engineering Research y Technology*, 6(7), 283-290.
- Salán Ballesteros, N. (2005). *Tecnología de proceso y transformación de materiales*. Barcelona: UPC.
- Schwalm, J., Gerstenmeyer, M., Zanger, F., y Schulze, V. (2020). Complementary Machining: Effect of tool types on tool wear and surface integrity of AISI 4140. *Procedia CIRP*, 87, 89-94.
- Siddique, M., Akhtar, M., Iqbal, M., Beg, N., y Haq, M. (2017). Turning parameter optimization for material removal rate of AISI 4140 alloy steel by Taguchi method. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(6), 848-855.
- Siddiqui, F., y Thakur, P. (2019). Optimal selection of parameters in CNC end milling of Al 7075 T6 alloy by TBLO. *International Journal of Engineering Sciences*, 11(4), 149-153.
- Tools United. (2020). *Plaquita de corte rómbica DCMT11T304 VP15TF*. Retrieved 10 de Diciembre de 2022, from <https://www.toolsunited.com/App/ESP/Article/ArticleDetailsPage/24696400130929674>
-