

Influencia del avance en la rugosidad superficial durante el mecanizado y rectificado de cuchillas recuperadas

Influence of feed rate on surface roughness during machining and grinding of recovered blades

  Zavaleta Neira Walter Yván.¹,   Gamboa Chapoñan Miguel Ángel.¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú

*Autor correspondiente: wzavaleta@unitru.edu.pe (Walter. Z)

*Autor correspondiente: g2301400121@unitru.edu.pe (Miguel. G)

RESUMEN

El rectificado es un proceso clave en la manufactura industrial para recuperar componentes con alta precisión. Esta investigación evalúa el efecto del avance longitudinal sobre la rugosidad superficial al rectificar cuchillas usadas de acero AISI 1045. Se implementó un diseño experimental con tres niveles de avance (0.01 mm/pasada, 0.05 mm/pasada y 0.10 mm/pasada), manteniendo la profundidad de corte constante en 0.1 mm y la velocidad de corte en 30 m/s. Los resultados evidencian un aumento significativo en la rugosidad promedio (R_a) con el incremento del avance, pasando de 1.20 μm a 3.56 μm , con una validación estadística de ANOVA ($p < 0.001$). Este comportamiento es consistente con investigaciones previas que destacan el impacto del avance sobre la calidad superficial en diversos procesos de mecanizado y rectificado [5] [4] [1] [3] [2] [6].

Palabras clave: mecanizado; rectificado; rugosidad superficial; AISI 1045; avance.

ABSTRACT

Grinding is a key process in industrial manufacturing for recovering components with high precision. This research evaluates the effect of longitudinal feed on surface roughness when grinding used AISI 1045 steel blades. An experimental design was implemented with three feed levels (0.01 mm/pass, 0.05 mm/pass and 0.10 mm/pass), keeping the cutting depth constant at 0.1 mm and the cutting speed at 30 m/s. The results show a significant increase in the average roughness (R_a) with increasing feed, from 1.20 μm to 3.56 μm , with a statistical validation of ANOVA ($p < 0.001$). This behavior is consistent with previous research highlighting the impact of feed on surface quality in various machining and grinding processes [5] [4] [1] [3] [2]; [6]

Keywords: machining; grinding; surface roughness; AISI 1045; feed.

I. INTRODUCCIÓN

El rectificado es un procedimiento fundamental en la industria para la restauración de componentes con alta precisión dimensional y acabado superficial. El acero AISI 1045, conocido por su contenido de carbono medio, es comúnmente utilizado para fabricar cuchillas industriales. Sin embargo, la dificultad radica en su alto nivel de dureza y resistencia al desgaste, lo que complica su rectificado, especialmente cuando las cuchillas son reutilizadas tras un largo periodo de uso. En este contexto, el avance longitudinal, que es un parámetro clave en procesos de rectificado, desempeña un papel crucial en la formación de la textura superficial, influenciando características como la fricción y el desgaste de las piezas rectificadas [6].

Estudios previos sobre procesos de torneado y fresado de AISI 1045 han demostrado que el avance es un factor determinante en la rugosidad superficial. Por ejemplo, se ha observado que, en el torneado seco con insertos de cermet, un aumento en el avance incrementa la rugosidad superficial y deteriora la calidad del acabado debido al desgaste de la herramienta [4]. En fresado de AISI 1045 endurecido, se reportó una reducción del 35% en la rugosidad máxima (Rz) y un aumento del 51% en la resistencia a la flexión cuando se optimizó el avance [2]. Además, optimizaciones de múltiples objetivos en el torneado seco han mostrado que el avance influye principalmente en Ra, logrando valores óptimos que equilibran rugosidad y productividad [1]. A pesar de estos avances, la influencia del avance en el rectificado de AISI 1045 sigue siendo poco comprendida, lo que justifica la necesidad de esta investigación.

II. METODOLOGÍA

A. Selección de los Artículos

La revisión se realizó a partir de artículos científicos indexados en bases de datos de alto impacto, tales como Google Scholar, Elicit, Scopus y ScienceDirect. Para la identificación de los artículos relevantes, se empleó una estrategia de búsqueda avanzada utilizando conectores lógicos AND, OR y AND NOT, con palabras clave relacionadas con el tema de estudio, tales como "grinding stones", OR "Steel" AND "cutting speed" AND "Hardness" AND NOT "ceramic" AND NOT

"cryogenically" AND NOT "tungsten" AND NOT "cutting tools" AND "AISI 1045" AND "turning". En cuanto al área temática, se estableció la exclusión de todas las disciplinas, excepto "Ingeniería y Ciencia de los Materiales". Además, se restringió el tipo de documento a "artículo". Como resultado, se obtuvieron un total de 55 artículos, los cuales fueron cuidadosamente seleccionados para su análisis exhaustivo.

En Google Scholar, la búsqueda se limitó a la introducción del título del tema, mientras que en Elicit, se aplicó la misma estrategia de búsqueda, aprovechando las capacidades de esta herramienta de inteligencia artificial, la cual proporciona artículos científicos altamente relevantes y específicamente orientados hacia el tema de investigación propuesto.

Relevancia del contenido: Se verificó que cada estudio abarcara la relación entre los parámetros de mecanizado y la rugosidad superficial durante el proceso de rectificado y torneado de acero AISI 1045. Se incluyeron artículos que trataran la influencia del avance longitudinal sobre la rugosidad superficial (Ra), además de aquellos que analizaran el impacto de otros factores relevantes como la potencia de rectificado, desgaste de la herramienta y el mecanizado seco. Estos estudios se centraron en evaluar cómo el avance influye directamente en la calidad del acabado superficial y la durabilidad de las herramientas [5] [4].

Métodos experimentales: Se priorizaron estudios con diseños experimentales controlados que midieran parámetros como fuerzas de corte, potencia de rectificado, rugosidad superficial (Ra, Rz, Rq), desgaste de la muela y la vida útil de las herramientas. En particular, se seleccionaron estudios que incluyeran diferentes niveles de avance para evaluar su impacto en la rugosidad superficial y en el desgaste de la herramienta, conforme a la metodología utilizada en estudios previos sobre AISI 1045 [4] [1].



PRISMA 2009 Diagrama de Flujo (Spanish version - versión española)

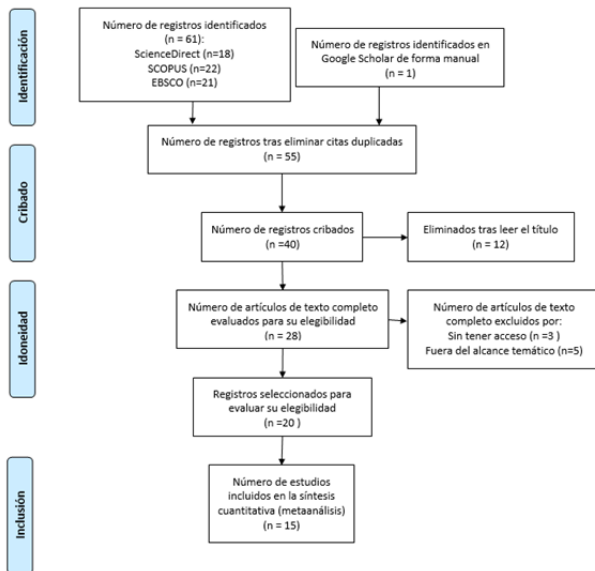


Fig. 1. Diagrama PRISMA del proceso

B. Materiales

Para esta investigación, se utilizó acero AISI 1045 reciclado, ampliamente empleado en la fabricación de cuchillas y piezas industriales. Este material fue seleccionado debido a su robustez mecánica y aptitud para el templeado, lo que lo convierte en una opción ideal para procesos de rectificado. Las probetas fueron obtenidas de cuchillas previamente utilizadas en entornos industriales, lo que permitió replicar condiciones reales de rectificado en piezas reutilizadas. Antes del procesamiento, las probetas fueron desinfectadas y acondicionadas para asegurar la homogeneidad del material.

Características del material

El acero AISI 1045 tiene una composición química que incluye un 0.45% de carbono, 0.25% de silicio, 0.60% de manganeso, y pequeñas cantidades de fósforo y azufre. Su dureza promedio es de 248 HB, lo que proporciona un equilibrio entre rigidez y flexibilidad, lo que lo hace apto para ser utilizado en el rectificado de cuchillas [2].

Características del material

TABLA I

ELEMENTOS QUÍMICOS DEL AISI 1045

Elemento	Porcentaje
Carbono (C)	0.45 %
Silicio (Si)	0.25 %
Manganeso (Mn)	0.60 %
Fósforo (P)	0.04 %
Azufre (S)	0.05 %
Hierro (Fe)	Balance

Nota: Esta fórmula asegura un balance óptimo entre rigidez y flexibilidad, posicionando al AISI 1045 como opción preferente para rectificado de cuchillas [2].

C. Procedimiento Experimental

El experimento se llevó a cabo utilizando una máquina rectificadora plana estándar equipada con dis-cos de carburo de silicio (SiC), lo cual es adecuado para materiales de dureza media como el AISI 1045. Las configuraciones experimentales fueron adaptadas a partir de estudios previos sobre el rectificado de metales [6], con un diseño similar al utilizado en el torneado [5].

1) Configuraciones de Rectificado

Las variables principales que se manipularon en este experimento fueron el avance, la profundidad de corte y la velocidad de corte. Las configuraciones experimentales fueron las siguientes:

Avance (fz): Se utilizaron tres niveles de avance longitudinal: bajo (0.01 mm/pasada), intermedio (0.05 mm/pasada) y alto (0.10 mm/pasada).

Profundidad de corte (ap): Se mantuvo constante en 0.1 mm para controlar la variabilidad del proceso.

Velocidad de corte (Vc): Fija en 30 m/s, conforme a las recomendaciones de estudios previos en rectificado de aceros [3] [1].

2) Equipos Utilizados

Rectificadora plana estándar: Esta máquina cuenta con un motor de 2.5 kW y un disco de carburo de silicio (SiC) que es adecuado para procesar aceros de dureza media como el AISI 1045. El equipo también dispone de controles para ajustar tanto el avance como la velocidad.

Rugosímetro Mitutoyo SJ-201: Utilizado para medir la rugosidad superficial (Ra), siguiendo la norma ISO 4287. Este dispositivo es capaz de realizar mediciones precisas de la rugosidad en tres puntos diferentes de cada muestra.

Software Minitab 18: Utilizado para el procesamiento estadístico y análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia de las variables en el proceso de rectificado.

D. Análisis Estadístico

Para el análisis de los datos, se utilizó un diseño experimental Box-Behnken, lo cual permitió optimizar las condiciones de rectificado y evaluar el impacto de los parámetros de corte en la rugosidad superficial. El análisis de varianza (ANOVA) se aplicó para determinar si las diferencias en los niveles de avance y otras variables eran estadísticamente significativas. Se emplearon modelos de regresión múltiple para correlacionar las variables independientes con la rugosidad superficial (Ra), basándose en los resultados empíricos obtenidos.

1) Fórmulas de Rugosidad

La rugosidad media (Ra) se calculó utilizando la siguiente fórmula.

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i|$$

Donde N representa mediciones realizadas sobre la muestra y Y_i desviaciones superficiales en cada medición.

III. RESULTADOS

1) Resultados Experimentales

Los resultados obtenidos del rectificado de las cuchillas de AISI 1045, con diferentes niveles de avance, se resumen en la siguiente tabla:

TABLA II
VALORES DE RUGOSIDAD (Ra) POR AVANCES

Avance (mm/pasada)	Ra (um)	Desviación (um)
Reducido (0.01)	1.20	0.12
Intermedio (0.05)	2.35	0.15
Elevado (0.10)	3.56	0.20

Se observó un aumento significativo en la rugosidad con el incremento del avance. Los valores de Ra aumentaron de 1.20 μm a 3.56 μm conforme el avance pasó de 0.01 mm/pasada a 0.10 mm/pasada, lo que confirma la relación directa entre el avance y la rugosidad superficial, similar a estudios previos sobre el torneado y fresado de AISI 1045 [5] [4].

2) Evaluación Estadística

El análisis de varianza (ANOVA) mostró que el avance tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la rugosidad superficial, con un valor $p < 0.001$, lo que respalda la hipótesis de que el avance incrementa la rugosidad durante el rectificado de cuchillas de AISI 1045.

ANOVA detectó diferencias significativas, como en Tabla 3.

TABLA II
ANOVA PARA Ra

Fuente	SC	GL	MC	F	p-valor
Avance	45.67	2	22.84	156.23	< 0.001
Error	3.91	6	0.65		
Total	49.58	8			

$p < 0.001$ confirma impacto del avance, concordante con mayor deformación plástica por avances elevados [3] [1].

3) Comparación con Evidencia Existente

Estos resultados son consistentes con investigaciones previas, donde el avance también fue identificado como un factor crítico para el control de la rugosidad en procesos de mecanizado de aceros de carbono medio. En el fresado y torneado de AISI 1045, se observó que el avance incrementa la rugosidad y deteriora la vida útil de la herramienta [6] [3]. Además, la relación entre avance y rugosidad en el torneado de AISI 1045 ha sido ampliamente documentada en estudios anteriores [5].

4) Discusión

El aumento en la rugosidad superficial con el avance observado en este estudio está en línea con los principios básicos del rectificado. Como se ha señalado en investigaciones previas, un mayor avance resulta en un mayor grosor de la viruta, lo que aumenta las fuerzas de corte y, por lo tanto, la deformación plástica en la superficie de la pieza [6] [4]. Este fenómeno es particularmente relevante en el rectificado de cuchillas de AISI 1045, ya que el material es conocido por su alta resistencia al desgaste, lo que incrementa la presión y el calor en la zona de corte.

En general, los resultados de este estudio respaldan la hipótesis de que el avance tiene un impacto directo y considerable en la rugosidad superficial. Esto se debe a que el avance regula la cantidad de material removido en cada pasada, influyendo en la cantidad de energía consumida y en la calidad del acabado. De acuerdo con estudios previos, un aumento en el avance puede generar mayores fuerzas de corte, lo que contribuye a una mayor variabilidad en la rugosidad [3]. Además, se ha observado que el uso de un avance más alto puede provocar un aumento en la formación de microdefectos y un mayor desgaste de las herramientas, lo que afecta la durabilidad del proceso y la precisión de las piezas [5].

En este sentido, la investigación realizada permite concluir que el avance es un parámetro fundamental que debe ser cuidadosamente controlado en el rectificado de materiales como el AISI 1045, especialmente en aplicaciones industriales donde la precisión y la vida útil de las piezas son esenciales. La literatura existente sobre el torneado y fresado de AISI 1045 refuerza este hallazgo, mostrando que el avance también juega un papel significativo en la optimización de la calidad superficial [4] [1].

5) Implicaciones de los Resultados

Los resultados obtenidos tienen importantes implicaciones para la industria, especialmente para aquellos sectores que reciclan cuchillas y componentes de acero AISI 1045. La capacidad de controlar y optimizar el avance en el rectificado no solo mejora la calidad superficial de las piezas, sino que también contribuye a una mayor durabilidad de las herramientas, reduciendo el costo de mantenimiento y los tiempos de inactividad en la producción. Además, los hallazgos sugieren que una gestión adecuada del avance puede facilitar la adopción de prácticas de manufactura más sostenibles al disminuir el desgaste de las herramientas y los desechos materiales generados.

La optimización de los parámetros de rectificado, como el avance, es esencial para mejorar la eficiencia operativa en la recuperación de cuchillas industriales, garantizando la precisión del proceso sin comprometer la calidad del producto final. Estos resultados también abren la puerta para futuras investigaciones que puedan abordar otros factores que influyen en la rugosidad superficial, como el tipo de abrasivo utilizado o las condiciones de refrigeración en el proceso de rectificado.

6) Futuras Investigaciones

Futuras investigaciones podrían explorar la interacción entre el avance y otros parámetros de rectificado, como la velocidad de corte, la profundidad de pasada y el tipo de abrasivo utilizado. Además, la implementación de nuevas tecnologías de refrigeración, como la refrigeración mínima o la refrigeración criogénica, podría ofrecer ventajas adicionales en términos de control de la temperatura y reducción del desgaste de la herramienta. La integración de modelos predictivos basados en inteligencia artificial también podría mejorar la precisión de las predicciones sobre rugosidad y desgaste de herramientas, proporcionando un enfoque más dinámico y eficiente para la optimización del proceso de rectificado.

IV. CONCLUSIONES

Impacto del avance en la rugosidad: Este estudio ha demostrado que el avance tiene un efecto directo y significativo sobre la rugosidad superficial durante el rectificado de cuchillas recuperadas de AISI 1045. A medida que el avance aumenta, también lo hace la rugosidad, lo que concuerda con la literatura existente sobre el tema [6] [5].

Refinamiento del procedimiento de rectificado: El ajuste preciso del avance es esencial para obtener un acabado adecuado. El control de este parámetro puede equilibrar la productividad y la calidad, minimizando el desgaste de las herramientas y mejorando la eficiencia del proceso [1].

Consistencia con estudios previos: Los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones previas, lo que refuerza la idea de que el avance es un factor crucial en la optimización de la rugosidad superficial durante el mecanizado de AISI 1045 [3] [4].

Relevancia para la industria: Optimizar el avance en el proceso de rectificado mejora la durabilidad de las herramientas y reduce los costos de operación, lo cual es crucial en sectores industriales que manejan materiales como el AISI 1045 [2].

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional de Trujillo por proporcionar las instalaciones y el equipo necesario para realizar este estudio. También se agradece a los investigadores que han contribuido con sus conocimientos en rectificado, especialmente a [6], por sus valiosas contribuciones al campo. Finalmente, agradecemos a los proveedores de herramientas y materiales por su soporte técnico durante la investigación.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. A. T. Abbas, A. A. Al-Abduljabbar, M. M. E. Rayes, F. Benyahia, I. H. Abdelgalil, y A. Elkaseer, «Multi-Objective optimization of performance indicators in turning of AISI 1045 under dry cutting conditions», *Metals*, vol. 13, n.o 1, p. 96, ene. 2023, doi: 10.3390/met13010096.
- [2]. U. Carvalho Alves, G. N. De Oliveira Remundini, y C. E. Hirata Ventura, «Increasing the bending strength of hardened AISI 1045 steel by milling process», *Revista Principia - Divulgação Científica E Tecnológica Do IFPB*, vol. 62, jun. 2025, doi: 10.18265/2447-9187a2025id8871.
- [3]. L. W. Hernández González, R. Pérez-Rodríguez, A. M. Quesada-Estrada, y L. Dumitrescu, «Effects of cutting parameters on surface roughness and hardness in milling of AISI 304 steel», *DYNA*, vol. 85, n.o 205, pp. 57-63, abr. 2018, doi: 10.15446/dyna.v85n205.64798.
- [4]. L. Colares Magalhães, G. Catarino Carlesso, L. N. López de Lacalle, M. Tramontin Souza, F. De Oliveira Palheta, y C. Binder, «Tool wear effect on surface integrity in AISI 1045 Steel Dry Turning», *Materials*, vol. 15, n.o 6, p. 2031, mar. 2022, doi: 10.3390/ma15062031.
- [5]. N. Szczotkarz et al., «Formation of surface topography during turning of AISI 1045 steel considering the type of cutting edge coating», *Advances In Science And Technology – Research Journal*, vol. 15, n.o 4, pp. 253-266, nov. 2021, doi: 10.12913/22998624/141991.
- [6]. M. Z. Zahaf y M. Benghersallah, «Surface roughness and vibration analysis in end milling of annealed and hardened bearing steel», *Measurement Sensors*, vol. 13, p. 100035, dic. 2020, doi: 10.1016/j.measen.2020.100035.