

Influencia del recubrimiento TiN en la rugosidad superficial durante el fresado de acero A36 con cortadores HSS

Influence of TiN Coating on Surface Roughness During Milling of A36 Steel with HSS Cutters

E. J. Escamilla-Barrera ^a, S. A. Arias-Gutiérrez ^{a,*}, C. A. Arroyo-Barranco ^a

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, 42184, Pachuca, Hidalgo, México

Resumen

Se evaluó el efecto del recubrimiento de nitruro de titanio (TiN) sobre la rugosidad superficial (Ra) en el fresado CNC de acero ASTM A36, utilizando cortadores HSS con y sin recubrimiento. Las pruebas se realizaron en seco y con aceite soluble, variando la velocidad de avance entre 30–45 m/min, la velocidad del husillo entre 1203–1805 r/min y empleando una profundidad de corte de 1 mm. En maquinado en seco, el cortador TiN no mostró un comportamiento consistentemente superior, obteniendo una reducción promedio del 11.4 % en Ra respecto al HSS convencional, pero sin significancia estadística. En cambio, bajo lubricación con aceite soluble, el recubrimiento generó una mejora promedio del 38.2 %, alcanzando un valor mínimo de Ra = 1.31 μm frente a 3.13 μm del cortador sin recubrimiento. Estos resultados evidencian que el desempeño del recubrimiento TiN no es universalmente superior en corte en seco, pero sí ofrece una mejora sustancial y consistente cuando el proceso se realiza con lubricación.

Palabras Clave: Cortadores, HSS, TiN, rugosidad, acero A36.

Abstract

The effect of titanium nitride (TiN) coating on surface roughness (Ra) during CNC milling of ASTM A36 steel was evaluated using HSS cutters with and without coating. Tests were conducted under dry and soluble-oil conditions, varying the feed rate between 30–45 m/min, spindle speed between 1203–1805 r/min, and employing a constant depth of cut of 1 mm. Under dry machining, the TiN-coated cutter did not exhibit consistently superior performance, achieving an average Ra reduction of 11.4% compared to the uncoated HSS cutter, but without statistical significance. In contrast, under lubrication with soluble oil, the coating produced an average improvement of 38.2%, reaching a minimum Ra value of 1.31 μm versus 3.13 μm for the uncoated cutter. These results demonstrate that the performance of the TiN coating is not universally superior in dry cutting, but it does provide substantial and consistent improvement when the process is carried out with lubrication.

Keywords: Cutters, HSS, TiN, roughness, A36 steel.

1. Introducción

La calidad superficial y la precisión dimensional en procesos de mecanizado dependen directamente del desempeño de las herramientas de corte. En operaciones de fresado, los cortadores deben cumplir con exigencias de productividad y acabado del sector metalmeccánico, factores esenciales para la competitividad industrial (Sierras y Equipos, 2021). El acero rápido (High-Speed Steel, HSS) continúa siendo una opción ampliamente utilizada por su bajo costo y facilidad de afilado; sin embargo, su rendimiento se ve limitado a altas velocidades de corte. Para mejorar sus

propiedades, se aplican recubrimientos duros como el nitruro de titanio (TiN), que incrementa la dureza, reduce la fricción y mejora la resistencia al desgaste y la oxidación (Fernández de Larrinoa, 2015).

Estudios recientes han confirmado la eficacia del recubrimiento TiN en el incremento de la vida útil de las herramientas HSS y en la reducción de la rugosidad superficial. Kumar et al. (2020) y Das et al. (2022) demostraron que el TiN actúa como barrera térmica, disminuyendo el desgaste abrasivo y la adhesión de material en el filo, lo que se traduce en una mejora significativa del acabado superficial. Asimismo,

*Autor para la correspondencia: ar366562@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: es435676@uaeh.edu.mx (Edgar Jovany Escamilla Barrera), ar366562@uaeh.edu.mx (Sebastián Antonio Arias Gutiérrez), arroyoca@uaeh.edu.mx (César Alfonso Arroyo Barranco)

investigaciones como las de Kumar y Singh (2021) y Dey et al. (2023) evidencian que la combinación de recubrimientos duros con el uso de refrigerantes solubles optimiza la disipación de calor, reduce las tensiones residuales y estabiliza el proceso de corte. Sin embargo, la magnitud del efecto depende de las condiciones de maquinado, especialmente la velocidad de corte y la velocidad de giro, por lo que resulta necesario su estudio experimental bajo materiales de uso común como el acero A36.

Este estudio tiene como propósito comparar el desempeño de cortadores HSS con y sin recubrimiento TiN en el fresado de acero A36, bajo condiciones de maquinado en seco y con refrigerante soluble, evaluando la rugosidad superficial promedio (Ra) como parámetro principal de calidad.

2. Selección y justificación de los cortadores

En los apartados del 2 al 5 se establecen los criterios técnicos que fundamentan la selección de los cortadores y del material base (placa de acero A36), así como los parámetros para la evaluación del desempeño en función de la rugosidad superficial. Asimismo, se describe el procedimiento experimental desarrollado para asegurar la reproducibilidad, trazabilidad y validez de los resultados obtenidos.

2.1. Contextualización del proceso

El fresado CNC es un proceso de mecanizado ampliamente utilizado para la fabricación de componentes metálicos, caracterizado por la remoción controlada de material mediante herramientas rotativas con múltiples filos de corte. Durante el proceso, la herramienta está sometida a condiciones de elevadas temperaturas, esfuerzos cíclicos y fricción constante, lo que exige que el material del cortador presente propiedades como alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad química (Kalpakjian & Schmid, 2014; Callister & Rethwisch, 2013).

El experimento se realizó en un centro de maquinado CNC vertical Sunmill, modelo JHV-550, de tres ejes. En la figura 1 se muestra la fresadora empleada.



Figura 1: Fresadora CNC Sunmill modelo JHV-550 utilizada en la experimentación. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Características técnicas de los cortadores seleccionados

En la industria metalmeccánica, la selección adecuada del cortador es clave para alcanzar la calidad superficial requerida

y mantener la precisión dimensional del producto, aspectos críticos en procesos de fresado (Whitehouse, 2011, pp. 2–3).

Para el desarrollo experimental se seleccionaron dos cortadores verticales de igual tipo y geometría, diferenciados únicamente por la presencia o ausencia de recubrimiento superficial.

Dimensiones nominales:

- Diámetro del cortador: 5/16" (7.94 mm)
- Diámetro del mango: 3/8" (9.52 mm)
- Número de filos: 4
- Material base: acero rápido (HSS)

Los cortadores se diferencian en su tratamiento superficial:

- Cortador 1: HSS sin recubrimiento, utilizado como referencia.
- Cortador 2: HSS recubierto con nitruro de titanio (TiN), capa color dorado caracterizada por su alta dureza y bajo coeficiente de fricción.

En la Figura 2 se presentan ambos cortadores seleccionados para el estudio: en la parte superior de la imagen se observa el cortador HSS sin recubrimiento, utilizado como referencia; y en la parte inferior, el cortador HSS recubierto con TiN.



Figura 2: Imagen comparativa de los cortadores utilizados en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

La elección de cortadores verticales (end mills) se basó en su estabilidad para controlar con precisión las trayectorias lineales de corte. Este tipo de herramienta al poseer menor masa rotacional y una mayor rigidez estructural en comparación con otro tipo de cortadores contribuye a la reducción de vibraciones y desviaciones dinámicas, lo que permite evaluar con mayor exactitud el efecto del recubrimiento sobre la rugosidad superficial del material mecanizado. (Krar, Gill, & Smid, 2009)

El uso de cuatro filos proporciona un equilibrio óptimo entre la capacidad de remoción de material y la calidad del acabado, ya que distribuye de manera uniforme los esfuerzos de corte y mejora la uniformidad superficial del material mecanizado (Groover, 2010). En contraste, las fresas de dos filos se emplean comúnmente para desbaste o materiales de baja dureza.

2.3. Comparación técnica

El recubrimiento TiN se caracteriza por su alta dureza, buena resistencia al desgaste, elevado punto de fusión y buena resistencia química (Restrepo Parra, Arango, & Casanova Trujillo, 2009, p. 214). Aplicado mediante la técnica de Physical Vapor Deposition (PVD), forma una capa cerámica

con alta dureza superficial (~2400 HV) y bajo coeficiente de fricción (~0.4). Estas propiedades se traducen en mayor resistencia al desgaste, mejor evacuación de viruta y un acabado superficial más uniforme (Kalpakjian & Schmid, 2008, pp. 607–641; Fernández de Larrinoa, 2015, pp. 23–25).

Por su parte, el cortador sin recubrimiento presenta una dureza superficial inferior (~800–900 HV), lo que puede generar mayor desgaste abrasivo, un aumento del calor por fricción y, consecuentemente, un incremento en la rugosidad de la superficie mecanizada, especialmente en procesos en seco. En la tabla 1 se resumen las principales propiedades técnicas reportadas para ambos tipos de cortadores.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los cortadores seleccionados. Fuente: Adaptado de Callister & Rethwisch (2013); Fernández de Larrinoa Estefanía (2015).

Propiedad	HSS sin recubrimiento	HSS recubierto TiN
Dureza superficial (HV)	~800-900	2300
Resistencia al desgaste	Moderada	Alta
Coeficiente de fricción	0.60-0.80	0.40-0.45
Resistencia de oxidación	Baja	Mejorada
Temperatura máxima de trabajo (°C)	600	~700-800

Nota: El símbolo “~” indica que los valores presentados son aproximados.

3. Selección y justificación de placa metálica

El acero estructural al carbono ASTM A36/A36M-19 fue seleccionado como material de trabajo debido a su amplia utilización en la industria metalmeccánica y de manufactura, especialmente en estructuras, componentes mecánicos y aplicaciones de mecanizado general. Desde el punto de vista económico y logístico, el A36 es un material fácilmente disponible en el mercado y con bajo costo relativo, lo que permite replicar el experimento en diversos entornos académicos o industriales sin requerimientos especiales de adquisición.

Desde el punto de vista composicional, se clasifica dentro del grupo de aceros al carbono de bajo contenido, al presentar un porcentaje máximo de 0.29 % de carbono, conforme a lo indicado en la Tabla 2.

Tabla 2: Clasificación de aceros al carbono en función a su contenido de carbono (% en peso). Fuente: Adaptado de Grupo Torices (2022).

Tipo de acero al carbono	Contenido de carbono, %
Bajo carbono	0.08-0.25
Medio carbono	0.25-0.60
Alto carbono	0.60-1.40

La microestructura del A36 está formada predominantemente por ferrita y perlita (Callister & Rethwisch, 2013, p. 339), lo que le confiere una buena tenacidad, ductilidad y maquinabilidad para operaciones convencionales como el fresado. En la Tabla 3 se muestra la composición química.

Tabla 3: Composición química del acero A36. Fuente: ASTM International (2019).

Acero al carbono	Composición, %			
	C (max)	F (max)	S (max)	Si (max)
A36	0.26	0.04	0.05	0.40

Las propiedades mecánicas del acero A36, resumidas en la Tabla 4, lo posicionan como un material adecuado para evaluar el efecto del tipo de herramienta sobre la calidad del mecanizado en condiciones de corte en seco y con uso de lubricante.

Tabla 4: Propiedades mecánicas del acero A36. Fuente: Adaptado de Azo Materials (2012), Henan Bebon Iron & Steel Co., Ltd. (2025), Muhammad et al. (2024), Selvaraj et al. (2023).

Propiedad	Valor típico	Unidad
Límite elástico (mínimo)	250	MPa
Resistencia a la tracción	400-550	MPa
Alargamiento (en 200mm/50mm)	20-23	%
Módulo de elasticidad	200	GPa
Dureza Brinell (HB)	119-162	HB
Densidad	7.85	g/cm ³
Contenido máximo de carbono	0.26	%

Las propiedades microestructurales y mecánicas del lote empleado fueron verificadas conforme a las especificaciones del proveedor y a los valores normativos de referencia. De acuerdo con la literatura y la norma ASTM A36

4. Medición de la calidad superficial

Todas las superficies de las piezas fabricadas presentan irregularidades que son función del material y del proceso de maquinado (Villanueva Pruneda & Ramos Watanave, 2010, p.91).

4.1. Importancia de la calidad superficial en procesos de mecanizado

La calidad superficial es un parámetro técnico fundamental en operaciones de mecanizado, ya que influye de manera directa en el comportamiento mecánico, funcional y estético de las piezas terminadas. Una superficie con rugosidad elevada puede incrementar la fricción, favorecer la concentración de esfuerzos y afectar la resistencia a la fatiga mecánica, lo que se traduce en una reducción en la vida útil del componente (Whitehouse, 2011).

En el ámbito industrial, un buen acabado superficial puede mejorar el rendimiento de ensambles, reducir el desgaste por contacto, facilitar la lubricación y evitar la necesidad de procesos secundarios como el rectificado o pulido (Kalpakjian & Schmid, 2008, pp. 635–641). Asimismo, la calidad de la superficie tiene implicaciones en la precisión dimensional, ya

que una rugosidad excesiva puede distorsionar la medición de cotas críticas, especialmente en piezas de ajuste fino.

En el caso específico del fresado CNC, el acabado superficial está condicionado por variables como la velocidad de corte, el avance por diente, la profundidad de pasada, el tipo de herramienta y el uso de recubrimientos superficiales. Por tanto, la evaluación cuantitativa de la rugosidad superficial no solo permite valorar el desempeño de la herramienta, sino también optimizar las condiciones de proceso, aumentar la repetibilidad y contribuir a la mejora de la calidad del producto final.

4.2. Parámetros de rugosidad superficial

La rugosidad se define como un conjunto de pequeñas desviaciones respecto a la superficie nominal (Universidad de Sevilla, s.f.). Estas irregularidades, producto de la interacción herramienta-material, son fundamentales para evaluar la calidad de una operación de fresado, ya que impactan en el comportamiento mecánico, funcional y estético de la pieza.

Para caracterizar la rugosidad se emplean diversos parámetros estandarizados, definidos por normas internacionales como ISO 4287, ISO 1302 e ISO 21920. Entre los más utilizados en ingeniería se encuentran:

- Ra (Roughness Average): se define como el valor promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias del perfil de rugosidad a la línea intermedia de la longitud de medición” (Universitat Politècnica de Catalunya, s.f., p. 3).
- Rz: Indica la media de las alturas pico a valle en cinco secciones consecutivas del perfil. Es más sensible que Ra a irregularidades pronunciadas.
- Rt: Representa la distancia vertical total entre el punto más alto y el más bajo de una longitud de medición. Se utiliza para detectar defectos puntuales.
- Rp y Rv: Son las alturas máximas de pico y profundidad máxima de valle, respectivamente, respecto a la línea media.

Para este ejercicio se ha priorizado el parámetro Ra, dado que es el más utilizado en la industria para caracterizar la rugosidad superficial, ya que ofrece una representación integral de las irregularidades que inciden directamente en el acabado y el comportamiento funcional de las piezas mecanizadas. Este parámetro permite analizar la relación entre la velocidad de avance, la velocidad de giro del husillo y el tipo de herramienta empleada.

4.3. Clasificación de acabados superficiales

Dependiendo del proceso de fabricación y del propósito del componente, se pueden alcanzar diferentes niveles de acabado superficial. A continuación, se presenta una clasificación de acabados superficiales según su valor de rugosidad Ra.

Tabla 5: Clasificación de acabados superficiales según valores típicos de rugosidad Ra. Fuente: Adaptado de Manual de métodos de fabricación metalmecánica (Villanueva Pruneda & Ramos Watanave, 2010).

Clase	Rugosidad Ra (μm)
Semirugoso	12.5
Medio	6.3
Semifino	3.2
Fino	1.6
Terso	0.8
Ground	0.4
Pulido	0.2
Espejo	0.1

En procesos de fresado, como el empleado en el presente estudio, la rugosidad superficial promedio típicamente alcanzable se sitúa en un rango de 0.8 a 6.3 μm Ra, en función de variables como el tipo de herramienta de corte, las condiciones de maquinado (velocidad de corte, avance, profundidad de corte) y las propiedades del material trabajado (Villanueva Pruneda & Ramos Watanave, 2010). Este intervalo constituye un marco de referencia técnico para la evaluación comparativa de los acabados superficiales obtenidos bajo las condiciones experimentales analizadas en esta investigación.

4.4. Instrumento utilizado: rugosímetro

La medición de la rugosidad superficial será realizada mediante un rugosímetro marca Mitutoyo, modelo SJ-201. En la Tabla 6 se describen las características del equipo y la imagen en la Figura 3.

Tabla 6: Especificaciones del rugosímetro Mitutoyo SJ-201. Fuente: Mitutoyo Corporation, (s.f).

Rugosímetro	Mitutoyo SJ-201
Pantalla	Digital
Rango de medición en X	12.5mm
Rango de medición en Z	350 μm (-200 μm ~+150 μm)
Velocidad de seguimiento en medición	0.5mm/s
Radio de la punta aguja	2 μm
Resolución	0.01 μm / 350 μm



Figura 3: Rugosímetro Mitutoyo SJ-201. Fuente: Mitutoyo Corporation, (s.f).

Principio de funcionamiento: el sistema opera mediante un palpador con punta de diamante (radio de 2 μm), cuya movilidad vertical se registra como la herramienta transcurre sobre la superficie mecanizada. Estas variaciones son convertidas electrónicamente en parámetros como Ra, Rz y Rt.

El procedimiento de medición se configuró para realizar cinco repeticiones consecutivas en el mismo punto de cada muestra, con una longitud de evaluación de 0.8 mm, conforme a la clasificación propuesta por la Universidad del País Vasco (2022). Este ajuste permite obtener un valor promedio representativo de la rugosidad superficial (Ra) y minimizar la variabilidad experimental.

5. Metodología

Se realizaron pruebas controladas para evaluar el efecto del recubrimiento TiN sobre la calidad superficial en el fresado CNC de acero A36. Este apartado describe los parámetros, la configuración experimental y el procedimiento seguido para la obtención y validación de los resultados.

5.1. Parámetros de corte

Velocidad de avance: se consideraron los valores recomendados por Krar, Gill y Smid (2009) para cortadores HSS según el material a mecanizar, los cuales se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Velocidades de corte para fresadora. Fuente: Krar, Gill y Smid (2009).

Material	Fresa de acero de alta velocidad (m/min)
Acero aleado	12 a 20
Aluminio	150 a 300
Bronce	20 a 35
Hierro fundido	15 a 25
Acero de maquinado libre	30 a 45
Acero para maquinaria	21 a 30
Acero inoxidable	10 a 25
Acero para herramienta	18 a 20

El rango de velocidad de corte seleccionado, comprendido entre 30 y 45 m/min, se fundamenta en que el acero A36, clasificado como acero al bajo carbono, presenta propiedades mecánicas y características de maquinabilidad comparables a las de un acero de maquinado libre. Dentro del rango de valores, se seleccionaron las siguientes velocidades de avance para realizar la experimentación (m/min): 30, 33, 36, 39, 42 y 45.

Velocidad de giro del usillo: para el cálculo de la velocidad de giro del usillo, se empleó la fórmula propuesta Krar, Gill y Smid (2005).

$$\frac{r}{\text{min}} = \frac{CS \times 1000}{\pi \times D} \quad 1$$

Donde:

CS = velocidad de corte (m/min),

D = diámetro de la herramienta (mm).

La fórmula 1 se aplicó a cada uno de los valores de velocidad de avance, permitiendo calcular las revoluciones por minuto (r/min) correspondientes. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Velocidades de avance y revolución para experimentación. Fuente: Elaboración propia en base a Krar, Gill y Smid (2009).

No. Experimento	Velocidad de avance (m/min)	Revoluciones (r/min)
1	30	1203
2	33	1323
3	36	1444
4	39	1564
5	42	1684
6	45	1805

A modo de ejemplo, a continuación, se ilustra la aplicación de la fórmula 1 para el experimento No. 1.

$$\frac{r}{\text{min}} = \frac{(30 \text{ m/min}) (1000)}{\pi \times 7.94 \text{ mm}} = 1203 \text{ r/min}$$

Profundidad de corte: se estableció en 1 mm. Este espesor permite equilibrar dos objetivos: por un lado, garantizar una extracción de material suficiente para evaluar la influencia real del recubrimiento TiN sobre el desgaste de la herramienta; y, por otro, evitar un aumento excesivo de la fuerza de corte que pudiera provocar vibraciones, deterioro del acabado superficial o comprometer la estabilidad del husillo.

Asimismo, este valor es coherente con recomendaciones industriales y prácticas experimentales, produce desgaste medible y reproducible en tiempos de ensayo razonables sin inducir fallo por fractura, por lo que es adecuado para comparar el rendimiento del recubrimiento TiN (Sandvik Coromant, 2005)

5.2. Procedimiento experimental

Teniendo como variable principal la velocidad de avance, y manteniendo constantes la velocidad de giro del husillo y la profundidad de corte, se diseñó en SolidWorks una pieza tridimensional que integra seis cajas, cada una correspondiente a cada velocidad de avance. Posteriormente, se realizó el código CNC necesario para el fresado definiendo las trayectorias de herramienta según los parámetros establecidos.

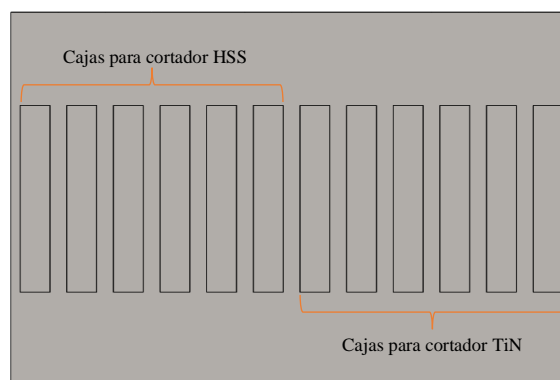


Figura 4: Vista frontal del diseño para la experimentación en SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento seguido para la realización de las pruebas de fresado constó de las siguientes etapas:

1. Preparación de la muestra: la placa de acero A36 fue previamente limpiada para eliminar contaminantes que pudieran afectar a la medición.
2. Montaje en fresadora: la placa se fijó firmemente sobre la mesa del centro de mecanizado CNC Sunmill modelo JHV-550, utilizando mordazas para garantizar la inmovilidad durante la operación.
3. Selección de la condición de corte: para las pruebas en seco, no se aplicó ningún tipo de lubricación ni refrigerante durante el mecanizado y para las pruebas con aceite soluble, se activó el sistema de refrigeración por aspersión, manteniendo un caudal constante durante todo el proceso.
4. Ejecución del fresado: se cargó el programa de control numérico para la experimentación, el cual contempló cuatro condiciones de maquinado:
 - A. Cortador HSS en seco.
 - B. Cortador HSS recubierto con TiN en seco.
 - C. Cortador HSS con refrigeración por aceite soluble.
 - D. Cortador HSS recubierto con TiN con refrigeración por aceite soluble.
5. Control del desgaste de la herramienta: entre cada serie de pasadas se revisó visualmente el estado del filo de la herramienta, a fin de evitar que el desgaste excesivo alterara los resultados de la rugosidad superficial.

5.3. Consideraciones para corte en seco y con aceite soluble

En el diseño experimental se incluyó la evaluación del fresado CNC bajo dos condiciones operativas contrastantes: en seco y con aplicación de aceite soluble. La elección de comparar ambas condiciones responde a la necesidad de analizar el comportamiento real de las herramientas frente a diferentes condiciones de desgaste durante el mecanizado.

El corte en seco es una práctica empleada en la industria manufacturera utilizada con el propósito de mejorar la sostenibilidad ambiental y reducir los costos asociados al uso de fluidos de corte. Sin embargo, al eliminar el efecto refrigerante y lubricante, la temperatura en la zona de corte tiende a incrementarse, lo que acelerará el desgaste del filo, aumenta la rugosidad superficial y provoca oxidación de la herramienta, particularmente en el caso de cortadores sin recubrimiento.

Por su parte, en las pruebas con refrigeración se utilizó aceite soluble de base mineral, preparado a una concentración del 8 % en agua, siguiendo las recomendaciones del fabricante. El uso de este tipo de lubricante cumple una doble función: proporcionar lubricación en la interfase herramienta-pieza y favorecer la disipación térmica durante el proceso de corte, contribuyendo así a reducir el desgaste del filo y mejorar la calidad del acabado superficial

El recubrimiento TiN, al aportar mayor dureza superficial y resistencia a la oxidación, se espera que muestre una ventaja más marcada en la condición de corte en seco, donde las condiciones de trabajo son más agresivas y el calor no es evacuado de forma eficiente. En cambio, con el uso de aceite soluble, las diferencias entre el cortador recubierto y el no

recubierto podrían atenuarse, dado que el lubricante contribuye a proteger parcialmente ambos tipos de cortadores.

La caracterización precisa de los materiales, herramientas y parámetros operativos, así como la definición programada de trayectorias mediante software CAD/CAM, constituyen los elementos fundamentales que garantizan la repetibilidad y validez del experimento. La integración del diseño en control número y la estandarización de condiciones de corte — incluyendo la profundidad de corte, velocidad de avance, velocidad del giro del usillo y de la presencia o ausencia de soluble — permiten establecer un marco experimental controlado. Esta configuración facilita la evaluación comparativa del rendimiento de cortadores HSS con y sin recubrimiento de TiN en el fresado de acero A36, específicamente en relación con la calidad superficial alcanzada.

6. Resultados y análisis

La Figura 5 muestra una imagen de la pieza mecanizada correspondiente a las condiciones de maquinado C y D del experimento, ambos realizados con aplicación de refrigerante soluble. En esta imagen se puede apreciar el trayecto de la herramienta sobre la superficie del acero A36, así como el patrón característico de marcas generadas por el proceso de fresado bajo condiciones controladas. La inspección visual de la superficie proporciona una primera evaluación cualitativa del acabado superficial, la cual sirve como complemento al análisis cuantitativo realizado mediante medición de rugosidad con rugosímetro.

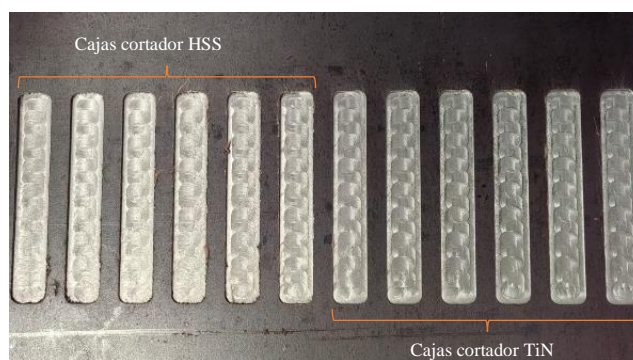


Figura 5: Superficie mecanizada del acero A36 correspondiente al fresado con aplicación de soluble. Fuente: Elaboración propia.

6.1. Comportamiento del maquinado en seco.

La Tabla 9 junto con la Figura 6, muestra los valores de rugosidad superficial obtenidos tras el proceso de maquinado en seco, utilizando ambos tipos de cortadores evaluados.

Tabla 9: Resultados obtenidos del maquinado en seco. Fuente: Elaboración propia.

Prueba	Cortador	Rugosidad (μm)
1	HSS	2.28
	TiN	2.65
2	HSS	4.02
	TiN	2.24

3	HSS	3.12
	TiN	3.40
4	HSS	3.27
	TiN	2.72
5	HSS	2.69
	TiN	3.00
6	HSS	2.99
	TiN	2.25

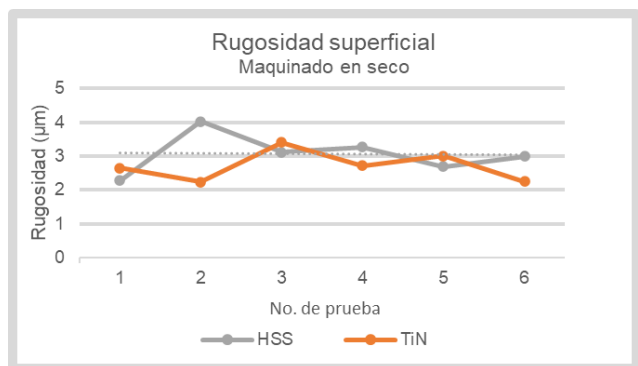


Figura 6: Rugosidad obtenida del maquinado en seco. Fuente: Elaboración propia.

consistente entre las distintas pruebas. Esto implica que, además de mejorar la rugosidad promedio, el recubrimiento contribuye a reducir la dispersión de los resultados, otorgando mayor confiabilidad al proceso de maquinado bajo condiciones secas.

Análisis ANOVA

Para determinar la existencia de diferencias significativas entre los promedios de rugosidad superficial (R_a) generados por los dos tipos de cortadores evaluados, se aplicó un Análisis de Varianza de un Factor (ANOVA), considerando las siguientes condiciones:

- Variable dependiente: Rugosidad superficial (R_a , μm)
- Factor de análisis: Tipo de cortador (2 niveles: HSS y TiN).
- Supuesto de igualdad de varianzas: verificado previamente mediante pruebas de homogeneidad.
- Nivel de significancia (α): 0.05

Tabla 11: ANOVA para la rugosidad superficial (R_a) en maquinado en seco. Fuente: Elaboración propia.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.3661	0.2696	4.9646

ANOVA: El análisis de varianza (ANOVA) arrojó un valor de $p = 0.2696$ lo cual es mayor que el umbral de significancia habitual ($\alpha = 0.05$), lo que indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores medios de rugosidad obtenidos con el cortador HSS y el cortador recubierto con TiN.

La Figura 7 refuerza los resultados del análisis estadístico, evidenciando el desempeño de ambos cortadores.

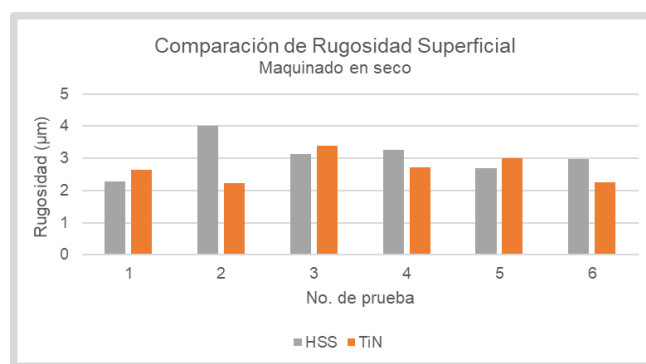


Figura 7: Comparación de los valores de rugosidad superficial durante el maquinado en seco. Fuente: Elaboración propia.

Desempeño comparativo: En 3 de las 6 pruebas (pruebas 2, 4 y 6), el cortador recubierto con TiN presentó un valor de rugosidad superficial menor al del cortador sin recubrimiento (HSS). Esto representa un 50% de las pruebas.

Comportamiento de la variable: Se observa una variabilidad considerable en los valores de rugosidad, particularmente en el cortador sin recubrimiento, el cual alcanza un valor máximo de $4.02 \mu\text{m}$ (prueba 2), mientras que el mínimo es de $2.28 \mu\text{m}$ (prueba 1). Por su parte, el cortador recubierto muestra un rango de valores más acotado, oscilando entre $2.24 \mu\text{m}$ y $3.40 \mu\text{m}$.

Análisis de promedios y varianzas

Para evaluar el impacto del recubrimiento TiN sobre la rugosidad superficial en condiciones de maquinado en seco, se calcularon los promedios y varianzas de rugosidad para cada tipo de cortador. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 10: Promedio y varianza de la rugosidad (R_a) en maquinado en seco. Fuente: Elaboración propia.

Grupos	Promedio (μm)	Varianza (μm)
Cortador HSS	3.0617	0.3439
Cortador TiN	2.7100	0.1993

Promedio: el valor promedio de rugosidad superficial obtenido con el cortador recubierto con TiN ($2.71 \mu\text{m}$) fue inferior al del cortador sin recubrimiento ($3.06 \mu\text{m}$), lo cual sugiere que el recubrimiento TiN contribuye positivamente a mejorar la calidad superficial en un 11.4% durante el maquinado en seco.

Varianza: La varianza obtenida con el cortador recubierto ($0.1993 \mu\text{m}$) fue significativamente menor que la del cortador sin recubrimiento ($0.3439 \mu\text{m}$), lo que indica que el comportamiento del cortador con TiN fue más estable y

Puntos óptimos

- Cortador HSS (sin recubrimiento): El valor más bajo de rugosidad superficial se obtuvo en la Prueba 1, con un $R_a = 2.28 \mu\text{m}$, lo que representa el mejor desempeño entre las seis condiciones evaluadas. Esta prueba corresponde a una velocidad de avance de 30 m/min , una velocidad de giro del husillo de 1203 r/min y una profundidad de corte de 1 mm .

- Cortador HSS con recubrimiento TiN: El resultado más favorable se presentó en la Prueba 2, con un $R_a = 2.24 \mu\text{m}$, correspondiente a una velocidad de avance de 33 m/min, una velocidad de giro del husillo de 1323 r/min y una profundidad de corte de 1 mm.

6.2. Comportamiento del maquinado con soluble

En la Tabla 12 y en la Figura 8 se presentan los valores de rugosidad superficial (R_a) obtenidos tras el maquinado con el uso de soluble.

Tabla 12: Resultados obtenidos del maquinado con soluble. Fuente: Elaboración propia.

Prueba	Cortador	Rugosidad (μm)
1	HSS	2.41
	TiN	2.33
2	HSS	2.65
	TiN	2.57
3	HSS	2.39
	TiN	1.66
4	HSS	3.76
	TiN	1.62
5	HSS	3.13
	TiN	1.31
6	HSS	3.29
	TiN	1.41

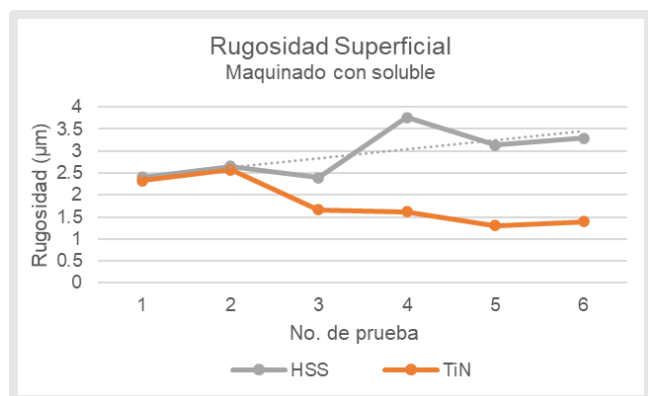


Figura 8: Rugosidad obtenida del maquinado con soluble. Fuente: Elaboración propia.

Desempeño comparativo: El cortador recubierto con TiN presentó un mejor desempeño en términos de calidad superficial respecto al cortador HSS sin recubrimiento. En todos los casos analizados, los valores de rugosidad superficial (R_a) fueron inferiores al utilizar el cortador TiN, lo cual sugiere que el recubrimiento contribuye significativamente a la mejora del acabado superficial en condiciones de maquinado con refrigeración.

La mayor diferencia se observó en la Prueba 5, donde el cortador TiN logró una rugosidad de $1.31 \mu\text{m}$, mientras que el HSS alcanzó $3.13 \mu\text{m}$, reflejando una reducción del 58% en la rugosidad superficial.

Comportamiento de la variable: El análisis de la rugosidad superficial mostró una tendencia clara hacia valores menores y más estables al emplear el cortador recubierto con

TiN. Los datos obtenidos revelan que la rugosidad asociada al cortador HSS presentó una mayor variabilidad, con valores que oscilaron entre $2.39 \mu\text{m}$ y $3.76 \mu\text{m}$, lo cual sugiere una mayor sensibilidad del filo a las condiciones de corte, posiblemente debido a una menor resistencia al desgaste o a la acumulación térmica.

En contraste, el cortador recubierto exhibió una respuesta más uniforme, con valores que fluctuaron en un rango más estrecho, de $1.31 \mu\text{m}$ a $2.57 \mu\text{m}$. Esta menor dispersión indica un mejor control sobre las condiciones del mecanizado, asociado posiblemente a una mayor estabilidad térmica y mecánica del filo de corte. En conjunto, los resultados sugieren que el recubrimiento TiN, en combinación con el uso de refrigerante soluble, no solo mejora la calidad superficial, sino que también contribuye a una mayor reproducibilidad del proceso de fresado en acero A36.

Análisis de promedios y varianzas

Tabla 13: Promedio y varianza de la rugosidad (R_a) en maquinado con soluble. Fuente: Elaboración propia.

Grupos	Promedio (μm)	Varianza (μm)
Cortador HSS	2.9383	0.2997
Cortador TiN	1.8150	0.2649

Promedio: El cortador recubierto con TiN presentó un promedio de rugosidad superficial (R_a) de $1.8150 \mu\text{m}$, mientras que el cortador HSS sin recubrimiento arrojó un promedio de $2.9383 \mu\text{m}$. Esta diferencia representa una mejora promedio del 38.2% en la calidad superficial al utilizar recubrimiento TiN bajo condiciones de maquinado con soluble.

Varianza: La varianza del cortador HSS fue de $0.2997 \mu\text{m}$, mientras que la del cortador TiN fue ligeramente menor, con $0.2649 \mu\text{m}$. Esto indica que, además de generar mejores resultados promedio, el cortador recubierto también mostró un comportamiento más estable y predecible, con menor dispersión en los valores de rugosidad.

Análisis ANOVA

El análisis se llevó a cabo bajo las mismas condiciones que el maquinado en seco.

Tabla 14: ANOVA para la rugosidad superficial (R_a) en maquinado con soluble. Fuente: Elaboración propia.

Origen de las variaciones	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	13.4098	0.0044	4.9647

ANOVA: El valor del estadístico F obtenido en el análisis de varianza es 13.4098, el cual resulta considerablemente mayor al valor crítico de F (4.9647) correspondiente al nivel de significancia del 5%. Este resultado indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los promedios de rugosidad superficial obtenidos con el cortador HSS sin recubrimiento y el cortador con recubrimiento TiN, al emplear refrigerante soluble durante el proceso de maquinado.

Asimismo, la probabilidad asociada al estadístico F (valor- $p = 0.0044$) es notablemente menor que el nivel de significancia convencional ($\alpha = 0.05$). Esto refuerza la evidencia para rechazar la hipótesis nula (H_0), que plantea que no existen diferencias significativas entre los grupos comparados. En otras palabras, se puede afirmar con un alto grado de confianza que el tipo de cortador influye de manera significativa en la rugosidad superficial, bajo las condiciones de maquinado con soluble.

La Figura 9 refuerza los resultados del análisis estadístico, evidenciando el desempeño de ambos cortadores.

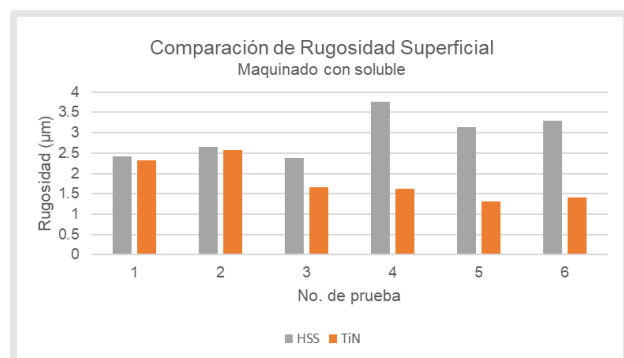


Figura 9: Comparación de los valores de rugosidad superficial (Ra), en maquinado con soluble. Fuente: Elaboración propia.

Punto óptimo

El valor más bajo de rugosidad se obtuvo en la Prueba 5 con cortador TiN, con un valor de $Ra = 1.31 \mu\text{m}$. Esta prueba corresponde a una velocidad de avance de 42 m/min, una velocidad de giro del husillo de 1684 r/min y una profundidad de corte de 1 mm.

6.3. Discusión de los resultados

El análisis comparativo de los valores de rugosidad superficial (Ra) obtenidos evidencia que el comportamiento tribológico de los cortadores está condicionado por la interacción entre las propiedades del material de la herramienta, el recubrimiento superficial y las condiciones de corte. En el maquinado en seco, las diferencias entre el cortador HSS y el recubierto con TiN fueron menos pronunciadas, debido a que la ausencia de lubricante incrementa la temperatura en la zona de contacto herramienta-pieza. Este aumento térmico induce un desgaste acelerado del filo y reduce la efectividad del recubrimiento, lo que explica la falta de significancia estadística observada ($p > 0.05$).

Por el contrario, bajo condiciones de maquinado con refrigerante soluble, la combinación de la capa cerámica de TiN y la lubricación externa genera un efecto sinérgico que mejora de manera significativa la calidad superficial. El lubricante reduce el coeficiente de fricción efectivo y favorece la disipación térmica, mientras que el recubrimiento TiN actúa como barrera de difusión, evitando la adhesión del material de la pieza sobre el filo. Este comportamiento se traduce en una disminución promedio del 38.2 % en la rugosidad superficial y en una menor dispersión de los valores obtenidos.

Los resultados obtenidos también son consistentes con los estudios recientes de Kumar et al. (2020) y Das et al. (2022), quienes demostraron que el recubrimiento TiN actúa como barrera térmica y reduce la adhesión de material sobre el filo, mejorando la calidad superficial. De igual forma, lo observado bajo condiciones lubricadas concuerda con los hallazgos de Kumar y Singh (2021) y Dey et al. (2023), donde la combinación de recubrimientos duros y refrigerante soluble favoreció una menor rugosidad.

Desde el punto de vista tribológico, la mejora observada puede explicarse por la reducción de la fricción y del desgaste abrasivo en la interfaz de contacto, así como por la estabilidad térmica del recubrimiento TiN, cuya dureza ($\sim 2300 \text{ HV}$) y baja afinidad química con el acero A36 minimizan la generación de calor y la deformación plástica superficial. Estos mecanismos coinciden con lo reportado por Kalpakjian y Schmid (2008) y Fernández de Larrinoa (2015), quienes destacan que los recubrimientos depositados mediante PVD, como el TiN, optimizan el comportamiento tribológico y la vida útil de las herramientas.

Adicionalmente, las ligeras variaciones observadas en los valores de rugosidad superficial podrían estar vinculadas con la presencia y distribución de inclusiones no metálicas inherentes al acero A36, como óxidos, sulfuros o silicatos, características típicas de los aceros al carbono laminados. Cabe destacar que la placa utilizada era nueva y no presentaba indicios visuales de oxidación ni deterioro superficial. En consecuencia, dichas variaciones pueden atribuirse a la microestructura interna del material, dentro de los rangos de inclusiones no metálicas permitidos por la norma ASTM A36/A36M, y no a contaminantes ni defectos superficiales externos.

En conjunto, los resultados confirman que la calidad del acabado superficial no depende únicamente del tipo de herramienta utilizada, sino del equilibrio entre las propiedades mecánicas, térmicas y tribológicas presentes en el sistema herramienta-pieza-condiciones de corte. La integración de recubrimientos TiN, especialmente en combinación con refrigerante soluble, representa una estrategia técnica eficaz para optimizar el desempeño del fresado de acero A36.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el recubrimiento TiN influye de manera diferenciada en la rugosidad superficial durante el fresado de acero A36 con herramientas HSS. En maquinado en seco, el cortador recubierto no mostró un rendimiento consistentemente superior, ya que solo en el 50 % de las pruebas presentó una menor rugosidad respecto al cortador sin recubrimiento. Esto evidencia que el beneficio del recubrimiento TiN bajo ausencia de lubricación no es determinante y depende fuertemente de las condiciones térmicas de corte.

En contraste, en el maquinado con aceite soluble el comportamiento fue claramente favorable al uso del recubrimiento. El cortador TiN obtuvo una mejora promedio del 38.2 % en rugosidad, con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) y con menor variabilidad en

comparación con el cortador HSS sin recubrimiento. Esto confirma que el recubrimiento TiN incrementa la estabilidad y confiabilidad del proceso cuando existe lubricación.

El aporte principal de este trabajo radica en demostrar que los recubrimientos TiN no garantizan siempre un acabado superior bajo corte en seco, información que es relevante para la ingeniería de manufactura, ya que orienta decisiones técnicas y económicas en entornos donde se busca reducir o eliminar fluidos de corte. Además, los resultados cuantifican el beneficio real del recubrimiento en condiciones lubricadas, aportando criterios para la selección de herramientas en procesos que priorizan calidad superficial y repetibilidad.

Adicionalmente, se identificaron puntos óptimos de operación donde se alcanzaron los valores mínimos de rugosidad superficial para ambos tipos de cortador y condiciones de corte, destacando que el mejor resultado global se obtuvo en la con cortador TiN y refrigeración, alcanzando un Ra de 1.31 μm , usando una velocidad de avance de 42 m/min y una velocidad de giro de usillo de 1684 r/min

Como línea de trabajo futura, se propone ampliar la investigación hacia el análisis del desgaste progresivo de la herramienta mediante técnicas de caracterización superficial (SEM, EDS) y correlacionar dichos resultados con la evolución de la rugosidad y la temperatura en la zona de corte. Asimismo, sería valioso evaluar otros recubrimientos PVD (como TiAlN o AlCrN) bajo condiciones de corte en seco, con el fin de identificar combinaciones óptimas de recubrimiento, lubricación y parámetros de corte para aplicaciones industriales de alto rendimiento.

Agradecimientos

Agregue sus agradecimientos hasta la aceptación del manuscrito.

Referencias

- ASTM International. (2019). ASTM A36/A36M-19: Standard specification for carbon structural steel. ASTM International. https://doi.org/10.1520/A0036_A0036M-19
- Azo Materials. (2012). ASTM A36 mild/low carbon steel. AZoM. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6117>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Materials science and engineering: An introduction* (9th ed.). Wiley.
- Camejo Ginébra, J. J., Domínguez Domínguez, J. A., & Marrero Águila, R. (2023). Apuntes sobre composición, estructura y propiedades de los materiales de construcción. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Facultad de Ingeniería Química. <https://www.researchgate.net/publication/370550593>
- CopperMetal. (s. f.). Acero al carbono o inoxidable: ¿Cuál es la mejor elección? Recuperado el 22 de julio de 2025 de <https://coppermetal.com.br/es/blog/acero-al-carbono-o-inoxidable-cual-es-la-mejor-eleccion/>
- Das, D., Bandyopadhyay, B. P., & Dey, A. (2022). Performance analysis of TiN-coated high-speed steel tools under different machining environments. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 354–363. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.09.014>
- Dey, A., Kumar, R., & Sahoo, A. K. (2023). Influence of hard coatings and cutting fluids on surface roughness and tool wear during milling operations. *Materials Today: Proceedings*, 72, 1678–1685. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.1678>
- Fernández de Larrinoa, J. (2015). Optimización de procesos de recubrimiento para herramientas de corte: Tecnologías de recubrimiento, métodos de caracterización y optimización de las propiedades [Tesis de máster]. Universidad del País Vasco. <https://addi.ehu.es/handle/10810/17319>
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Grupo Torices. (2022, 10 de octubre). Los tipos de acero al carbono y sus aplicaciones. <https://grupotorices.com/blog/los-tipos-de-acero-al-carbono-y-sus-aplicaciones/>
- Henan Bebon Iron & Steel Co., Ltd. (2025). A36 grade structural steel technical datasheet. https://www.bebonchina.com/v3/bebon-show/news/a36-grade-structural-steel-technical-datasheet_2843.html
- Herramientas Cleveland. (2012). Cortador vertical acero alta velocidad [Folleto técnico]. Grainger México. https://www.grainger.com.mx/static/ft/20023376_TD.PDF
- International Organization for Standardization. (1989). ISO 8688-2:1989 Tool life testing in milling — Part 2: End milling. ISO. <https://www.iso.org/standard/16092.html>
- Kalpakistan, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufacturing engineering and technology* (5th ed., pp. 607–641). Pearson.
- Krar, S., Gill, A., & Smid, P. (2009). *Technology of machine tools* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Kumar, R., & Singh, T. (2021). Effect of TiN and TiAlN coatings on tool performance and surface finish in milling mild steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(1–2), 355–366. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06435-7>
- Kumar, S., Sharma, V., & Singh, R. (2020). Experimental investigation on TiN-coated HSS tools for improved surface integrity in milling. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(10), 1137–1146. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1776542>
- Mitutoyo Corporation. (s. f.). Surftest SJ-201 / SJ-301: Rugosímetros portátiles [Folleto técnico]. Allmetech. Recuperado el 3 de julio de 2025 de https://allmetech.com/images/brosuri/mitutoyo/Surftest_SJ201_SJ301_PRE%20-%20rugozimetre.pdf
- Muhammad, A., Umri, M., Noor, M., Prasetyo, D., Dewi, I., Prasmana, A., Baihaqi, M., & Abdillah, H. (2024). Investigating the effects of partitioning temperature fluctuations on the mechanical properties of ASTM A36 carbon steel using Q-P-T heat treatment: An experimental study. *Jurnal Polimesin*, 22(3). <https://doi.org/10.30811/jpl.v22i3.5007>
- Restrepo Parra, E., Arango Arango, P. J., & Casanova Trujillo, S. (2009). Algunos conceptos sobre nitrado de titanio y el carburo de titanio. *Dyna*, 76(157), 213–224. <https://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=49611942021>
- Sandvik Coromant. (2005). *Metalcutting technical guide – Milling*. Sandvik Coromant. https://dcngli4g50fhp.cloudfront.net/userfiles/ad/sandvik/documents/sandvik_5747275_catalog.pdf
- SENA – Centro Colombo Alemán CCA – ASTIN. (1995). *Herramientas de corte: Materiales y aplicaciones* (Ed. 49, p. 23). SENA. https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/1170
- Selvaraj, S., Manivannan, S., Venkatesh, R., & Karthikeyan, M. (2023). Influence of heat input on the mechanical characteristics, corrosion and microstructure of ASTM A36 steel welded by GTAW technique. *Heliyon*, 9, e19708. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19708>
- Sierras y Equipos. (2021). Importancia de los recubrimientos en las herramientas de corte. <https://sierrasyequipos.com/uncategorized/importancia-de-los-recubrimientos-en-las-herramientas-de-corte/>
- Universidad de Sevilla. (s. f.). Rugosidad superficial. Recuperado el 25 de junio de 2025 de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60335/fichero/2.RUGOSIDAD+SUPERFICIAL+LISTO.pdf>
- Universitat Politècnica de Catalunya. (s. f.). Estudio de la rugosidad superficial mediante fresado de alta velocidad (p. 3). Recuperado el 17 de mayo de 2025 de <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/6b129e15-5e2b-4a4d-9791-c99e094d6076/content>
- Villanueva Pruneda, S. A., & Ramos Watanave, J. (2010). *Manual de métodos de fabricación metalmeccánica* (4.ª ed.). AGT Editor.
- Whitehouse, D. J. (2011). *Handbook of surface and nanometrology* (2nd ed.). CRC Press