



Análisis comparativo de métodos de evaluación del desgaste en texturas con aplicación al mecanizado de titanio

Irene Del Sol¹, Javier García-Fernández¹, Patricia Iglesias², Juan Manuel Vázquez-Martínez¹, Moisés Batista¹, Jorge Salguero¹

¹ Departamento Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz, irene.delsol@uca.es, javier.garcia@uca.es, moises.batista@uca.es, juanmanuel.vazquez@uca.es, jorge.salguero@uca.es

² Department of Mechanical Engineering, Kate Gleason College of Engineering, Rochester Institute of Technology, Nueva York, Estados Unidos, pxieme@rit.edu

El texturizado de herramientas de corte es una mejora del diseño de herramientas que facilita el mecanizado de materiales difíciles como las aleaciones de titanio. Se trata de una solución que incrementa la sostenibilidad del mecanizado al facilitar la reducción de lubricantes y disminuir el desgaste de herramientas. Aunque actualmente existen varias investigaciones al respecto, la mayoría se centran en aplicaciones directas sin observar en detalle la evolución del desgaste producido utilizando ensayos tribológicos simplificados.

Este trabajo presenta un estudio comparativo de la metodología de caracterización del material eliminado con el objetivo de analizar el efecto de la orientación de las texturas en el comportamiento tribológico de herramientas de corte con posible aplicación al mecanizado de titanio. En esta metodología, se realizan ensayos plano sobre plano con el par de contacto Ti- WC-Co, analizando el efecto de la orientación de la textura a 0°, 45° y 90°. Para la evaluación la pérdida de material de pin este estudio propone tres métodos diferentes. En dos de ellos se mide la pérdida de material al final del ensayo analizando en uno la reducción de la masa y en el otro la longitud del pin empleado. El tercer método es un método medición indirecta e in situ que permite estudiar la posición en Z del cabezal que sujeta el pin, utilizando los sensores propios del tribómetro empleado y permitiendo un estudio de la evolución en el tiempo.

Los resultados muestran variaciones significativas entre las metodologías empleadas que se ven influenciadas por la orientación de las texturas. Es especialmente significativo el efecto debido a variaciones en el proceso relacionadas con la sujeción del pin y el desgaste del disco en aquellas mediciones realizadas por los sensores del equipo. Sin embargo, este método permite evaluar el efecto de la distancia recorrida y la linealidad de respuesta al desgaste.

1. Introducción

El Ti6Al4V, conocido por su alta resistencia, bajo peso y excelente resistencia a la corrosión, es probablemente la aleación de titanio más utilizada en la industria. Debido a estas magníficas propiedades mecánicas, se emplea comúnmente en aplicaciones aeroespaciales, médicas y de ingeniería de alto rendimiento, donde se requiere una alta relación resistencia-peso y una buena resistencia a la fatiga. Sin embargo, esta aleación tiene una baja maquinabilidad debido a su alta resistencia, baja conductividad térmica, fuerte tendencia al endurecimiento y alta reactividad química que dificultan su fabricación encareciendo su uso significativamente. Este encarecimiento se debe a que el mecanizado del Ti6Al4V está asociado a un desgaste significativo de la herramienta de corte y el consecuente deterioro de la integridad superficial de la pieza mecanizada [1], por lo que deben utilizarse herramientas de elevada resistencia, y coste.

Durante el proceso de mecanizado, las herramientas de corte aplican altas presiones compresivas, causando un mecanismo de cizalladura que genera virutas aserradas. Estas virutas fluyen sobre la cara de desprendimiento de la herramienta de corte, lo que provoca una fricción severa que genera calor adicional, sumándose a la temperatura producida durante el proceso de cizalladura. Se estima que hasta el 80% del calor generado se transfiere a la herramienta debido a la baja conductividad térmica del Ti6Al4V, lo que impide que el calor sea evacuado por las virutas y permanezca en la zona de corte [2]. Esta elevada temperatura degrada las propiedades mecánicas de la herramienta y, combinada con las altas presiones de contacto, provoca un desgaste prematuro de la herramienta [3].

Este desgaste se produce tras la combinación de varios mecanismos de desgaste: abrasión, adhesión, fatiga, difusión, agrietamiento térmico y deformación plástica. Entre ellos, el mecanismo predominante es la adhesión, tanto primaria/directa como secundaria/indirecta, que conducen al desgaste de flanco y de cráter de la herramienta [4]. Por un lado, el desgaste por adhesión directa implica la transferencia directa de partículas de la herramienta a las virutas. Por otro lado, el desgaste por adhesión indirecta se produce por la incorporación de fragmentos macroscópicos del material de la pieza a la herramienta de corte. Estos fragmentos no son mecánicamente estables y pueden desprenderse de la superficie de corte debido a las elevadas fuerzas de corte, dando lugar al desgaste de la herramienta [5,6]. Además, este mecanismo puede ocurrir simultáneamente con los anteriores, creando un efecto sinérgico sobre las condiciones iniciales de la herramienta, disminuyendo significativamente su vida.

Para reducir estos problemas, en el mecanizado Ti6Al4V se utilizan herramientas de corte con alta dureza, conductividad térmica y módulo de Young [2]. Los materiales más comunes incluyen carburos cementados recubiertos y no recubiertos, principalmente carburos de wolframio (WC-Co), con contenidos de cobalto que varían entre el 6-12% [7]. Asimismo, el rendimiento del mecanizado del Ti6Al4V se puede incrementar mediante el uso de geometrías rompevirutas en la cara de desprendimiento, lo que reduce la longitud de contacto y área de contacto [8], así como con recubrimientos específicos de bajo coeficiente de fricción como TiAlN o TiCN [9]. El uso de fluidos de corte (refrigerantes/lubricantes) también está ampliamente aceptado, con el objetivo de disipar el calor y reducir la fricción [10] que recientemente se han enfocado en el uso de técnicas de enfriamiento criogénico para aumentar la sostenibilidad [11].

Sin embargo, la técnica que más interés científico ha generado en los últimos años es el texturizado de las herramientas de corte. El texturizado superficial consiste en modificar la superficie eliminando material selectivamente para crear estructuras de diversas escalas (generalmente micro/nanométricas) y geometrías (como dimples, ranuras o pequeñas cavidades) [12]. Estas estructuras se proponen como una solución potencial para mejorar el rendimiento tribológico de las herramientas de corte, especialmente en el mecanizado de aleaciones de baja maquinabilidad [13]. Las texturas generalmente se localizan en la cara de desprendimiento, con el fin de reducir el área de contacto viruta/herramienta [14] y mejorar la capacidad de retención de partículas abrasivas desprendidas [15, 16]. También permite modificar la capacidad de retención de fluidos hacia tendencias de absorción [17], lo cual es particularmente interesante para los procesos de mecanizado, ya que reduce la cantidad de lubricante empleado, mejorando la sostenibilidad del proceso [18]. Los estudios actuales realizados para el mecanizado de varios materiales demuestran que el uso de texturas en las herramientas de corte disminuye la temperatura alcanzada en el proceso [19] y las fuerzas de corte [20], aumentando la vida útil de la herramienta de corte [21, 22]. En la aleación Ti6Al4V, el uso de herramientas de corte texturizadas ha demostrado beneficios significativos en el mecanizado bajo condiciones lubricadas, reduciendo la fuerza de corte hasta un 30% y el consumo de energía hasta un 20% [23]. Esto se debe a la disminución del contacto entre la viruta y la herramienta, así como a una mejor retención del lubricante. Además, la textura actúa como acumulador de lubricante, mitigando los efectos de adhesión y prolongando la vida útil de la herramienta [24].

Algunos estudios han analizado los parámetros geométricos de las texturas revelando el ancho, la profundidad y la distancia de las micro-ranuras respecto al filo de corte como los más significativos para optimizar los aspectos mecánicos [25], pero la orientación de la textura apenas ha sido estudiada en la literatura científica [26]. Además, la mayoría de los estudios encontrados se centran en la influencia directa de las herramientas de corte texturizadas en los procesos de mecanizado, pero pocos trabajos investigan la caracterización del comportamiento tribológico de las superficies texturizadas en herramientas de corte en experimentales simplificados.

Los autores ya estudiaron las ventajas del uso de ensayos tribológicos simplificados para la caracterización del desgaste de herramientas en procesos de mecanizado [27]. Este tipo de ensayos, ampliamente empleados en el sector del transporte [28,29] y en la caracterización de recubrimientos [30], permiten investigar el comportamiento particularmente adecuado para estudiar las relaciones entre los mecanismos de desgaste y parámetros como la presión de contacto, la velocidad de deslizamiento y las condiciones ambientales, permitiendo evaluar la capacidad de las superficies texturizadas para reducir el coeficiente de fricción en condiciones de deslizamiento seco y lubricado [31, 32], así como la modelización del coeficiente de fricción y tasas de desgaste en procesos de fabricación [33], entre otros.

En concreto, los ensayos de tipo bola sobre plano con deslizamiento lineal oscilante se rigen por la norma ASTM G133-22 [34]. Esta norma es ampliamente conocida, para el caso de ensayos tribológicos en configuración de deslizamiento lineal oscilante, proporcionando un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste de materiales bajo condiciones de deslizamiento alternativo. En este método, los materiales son probados en pares (bola sobre plano) bajo condiciones nominalmente no abrasivas, con un conjunto fijo de parámetros de ensayo para estudios comparativos entre laboratorios (carga, velocidad de deslizamiento, materiales, etc.). La norma especifica en detalle aspectos esenciales como el equipo, las muestras de ensayo, el procedimiento y los cálculos necesarios para obtener resultados con precisión y reproducibilidad aceptables.

Esta también establece unos posibles métodos de evaluación del desgaste para determinar la pérdida del volumen (mm^3) de la muestra (pin o plano) [36]. El primer método calcula el volumen de desgaste a partir de la pérdida de masa de la muestra (diferencia entre el peso inicial y final tras el ensayo tribológico) y la densidad del material de la muestra (ecuación 1).

$$V = \frac{m}{\rho} 1000 \quad (1)$$

El segundo método emplea relaciones geométricas derivadas de las características del desgaste en la muestra, generando ecuaciones específicas para cada caso. En el caso de la evaluación geométrica del desgaste en el plano, la norma recomienda la fórmula descrita en la ecuación 2, basada en las características geométricas de la huella de desgaste.

$$V_f = \frac{a}{3b} \pi \left[h_o^2 (3R_o - h_o) - h_w^2 (3R_w - h_w) \right] \quad (2)$$

Donde R_o es el radio inicial de la esfera de carburo utilizada como pin, R_w es el radio del pin después del ensayo tribológico, a es el eje mayor de la elipse y b es el eje menor de la elipse. Los términos h_o y h_w se determinan mediante las siguientes ecuaciones.

$$h_w = R_w - \sqrt{R_w^2 - b^2} \quad (3)$$

$$h_o = R_o - \sqrt{R_o^2 - b^2} \quad (4)$$

Estos procedimientos son válidos cuando el pin es una bola ya que se basan en el efecto de dicha geometría según el aumento de la profundidad del surco para su evaluación. Sin embargo, cuando el contacto de estudio es plano sobre plano, la ecuación 2 deja de ser válida al no causar desviaciones geométricas en la huella de desgaste teórica. Asimismo, la aparición de mecanismos de desgaste vinculados a la adhesión dificulta la evaluación de los ensayos siguiendo los procedimientos propuestos en este tipo de normas [35].

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es comparar los métodos de evaluación del desgaste recomendados por la norma ASTM G133, la sensórica propia del equipo para cuantificar la pérdida de volumen del pin plano de Ti al enfrentarlo contra los discos de WC-Co. De este modo se pretende establecer una metodología de trabajo que permita la caracterización en ensayos simplificados de los mecanismos de desgaste de material de herramienta de corte texturizado, con el fin de comprender el comportamiento de las texturas en diferentes orientaciones de deslizamiento (0° , 45° y 90°) en condiciones en seco y lubricada.

2. Metodología

2.1. Material

El par tribológico utilizado en esta investigación son discos de carburo de wolframio contra pines cilíndricos de titanio.

Para ello se cortaron discos planos de WC-10%Co a 2 mm de grosor. Estos se obtuvieron de un mango cilíndrico de herramienta de 32 mm de diámetro cortándolos por electroerosión con hilo (WEDM) para evitar introducir

tensiones residuales o causar modificaciones microestructurales. Posteriormente, se pulieron para lograr una rugosidad máxima de $R_a \leq 0.1 \mu\text{m}$ y $R_z \leq 0.2 \mu\text{m}$ eliminando así la capa blanca generada por el proceso. Tres de los discos de WC-10%Co fueron texturizados creando líneas paralelas dentro de un área circular de 28 mm de diámetro. Estas líneas se separaron una distancia de 0.1mm. Para ello se utilizó un láser infrarrojo de femtosegundos (Lasing LS-MARKPRO SC-IR 21002) con una longitud de onda de $\lambda=1030 \pm 5 \text{ nm}$, una duración de pulso de 354 fs y un diámetro de punto de 25 μm . Los parámetros láser seleccionados fueron 50 W de potencia, 2 MHz de frecuencia y una velocidad de escaneo de 200 mm/s, lo que implica una energía de pulso (E_p) de 25.0 μJ y una densidad de energía (E_d) de 5.09 J/cm². Estos parámetros han sido optimizados en estudios previos para una adecuada ablación de carburo de wolframio.

Los pines empleados son de Ti6Al4V, provenientes de una barra de 4 mm de diámetro, estableciendo una longitud inicial de 10 mm.

2.2. Ensayos tribológicos

Los ensayos tribológicos seleccionados fueron de tipo pin plano sobre plano con deslizamiento lineal oscilatorio utilizando un tribómetro multifuncional Rtec MFT-5000. Debido a la geometría cilíndrica del pin, la configuración de la prueba tribológica puede considerarse como plano sobre plano. Esta configuración, no es muy habitual, pero se eligió debido a su similitud con la geometría del proceso de mecanizado, donde una sección constante de viruta desliza sobre la cara de desprendimiento de la herramienta.

La disposición habitual de los materiales ensayos tribológicos sitúa el material más blando en los discos y el de mayor dureza en el pin. En esta configuración se ha elegido una disposición contraria para reproducir con mayor similitud el proceso de corte y poder analizar el paso de la viruta sobre la herramienta. Durante el proceso se capturó la altura del cabezal del tribómetro registrando su posición en función del tiempo.

Los ensayos de desgaste se realizaron aplicando una carga normal de 50 N en un recorrido lineal de 10 mm y a una frecuencia de 10 Hz, durante 250, resultando en una distancia total de deslizamiento de 50 m. Con el objetivo de evaluar la influencia de la orientación de la textura frente a la dirección de deslizamiento, se probaron cuatro condiciones tribológicas diferentes: superficies no texturizadas y texturizadas con orientaciones de deslizamiento frente a la textura de 0°, 45° y 90°. Estas condiciones se evaluaron tanto en ambientes secos como lubricados. Para las condiciones lubricadas, se depositaron 0.5 ml de lubricante Accu-Lube LB-5000 sobre la superficie del disco antes del ensayo. Este micro-lubricante a base de aceite natural es adecuado para operaciones de corte de materiales no ferrosos y se utiliza ampliamente en el mecanizado de componentes de Ti6Al4V en la industria aeroespacial.

Tras cada ensayo, las muestras se limpiaron por ultrasonidos. Se han realizado macrografías de la huella con un microscopio estereoscópico Leica S9i para su caracterización cualitativa. Posteriormente, se evaluaron los resultados obtenidos en la huella de desgaste utilizando un microscopio de foco variable ALICONA IF G5+, y el software *MountainsMap*® para el análisis de las topografías de la huella de desgaste y los parámetros de rugosidad.

Asimismo, se pesaron los pines en una balanza Ohaus Pioneer PA214 de resolución 0,01 mg y se midió su longitud con un micrómetro, para evaluar el desgaste producido en los mismos. Esta operación se repitió al menos veces antes y después de cada ensayo. Esta caracterización del pin es necesaria, al ser el material más blando y por tanto con mayor variación en geometría dentro del par de contacto.

3. Resultados y discusión

3.1. Desgaste del WC-Co

Los ensayos de desgaste generaron unas huellas de desgaste en forma de colisos que en todos los casos se enmarcan dentro de unas dimensiones similares, 13 mm de largo y 4 mm de ancho (Figura 1). Estas medidas coinciden con la longitud de deslizamiento y el diámetro del pin pero la estabilidad de la huella varía en función de la orientación de los surcos y de las condiciones de lubricación, siendo mucho más inestables e imprecisas en los ensayos lubricados al disminuir la fricción durante los mismos. La presencia de texturas también genera una mayor definición de la huella de desgaste, especialmente en los extremos, registrando aparentemente más adhesión del pin de Ti sobre la superficie de WC-Co. Esto se aprecia gracias a un significativo cambio de color, a más claro, y un aumento de brillo en la superficie desgastada, debido a la presencia de Ti. Pese a tener unas dimensiones considerables, las ecuaciones facilitadas por la norma ASMT G133 no son aplicables ya que las características de los pines planos, no permiten evaluar la profundidad de la huella a través de los cambios en el ancho del surco. Asimismo, la variación obtenida en peso era insignificante limitando el uso del primer método de evaluación, la pérdida de masa del disco, definida por la ecuación 1.

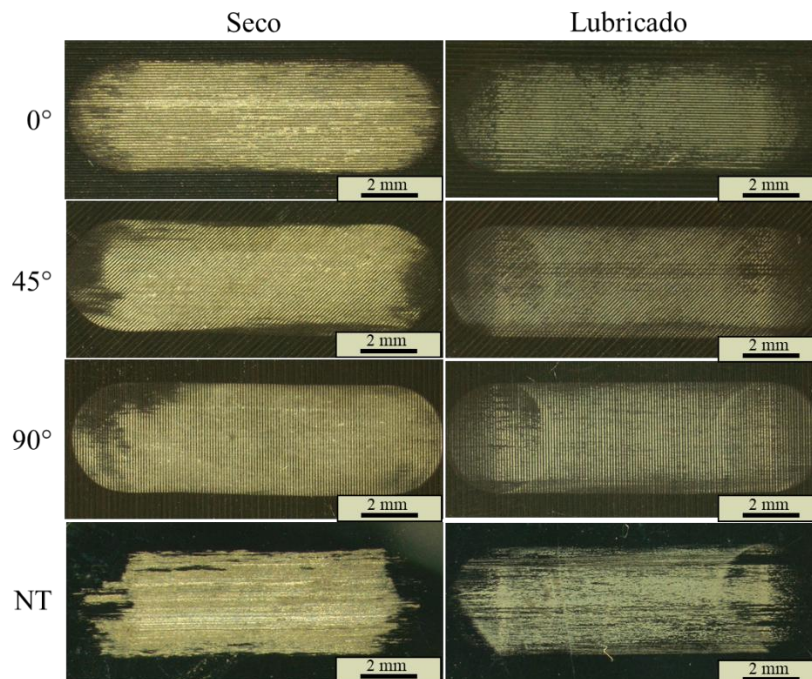


Figura 1: Captura ilustrativa del formato de imagen.

Por ello, pese a que la norma no lo recomienda, se ha procedido al análisis mediante perfilometría óptica, mostrando los perfiles analizados en la Figura 2. En este caso los resultados evidencian una leve adhesión de titanio en la mayor parte de los ensayos lubricados, presenciando una altura ligeramente superior (entre 4-8 μm) sobre la superficie tanto en los casos texturizados como en los no texturizados. Sin embargo, las condiciones en seco, generalmente han ocasionado una abrasión de la superficie de base (WC-Co). Surcos de hasta 20 μm , probablemente ocasionados por el arrastre de partículas de WC-Co adheridas al pin, aparecen en las muestras NT, de 0 y 45°. En concreto, en los ensayos a 0° se aprecia como algunos surcos han sido eliminados casi por completo por mecanismos abrasivos obteniendo geometrías más cercanas a las de las muestras NT ya que el pin termina adquiriendo la geometría de las muestras y generando el negativo de la textura realizada

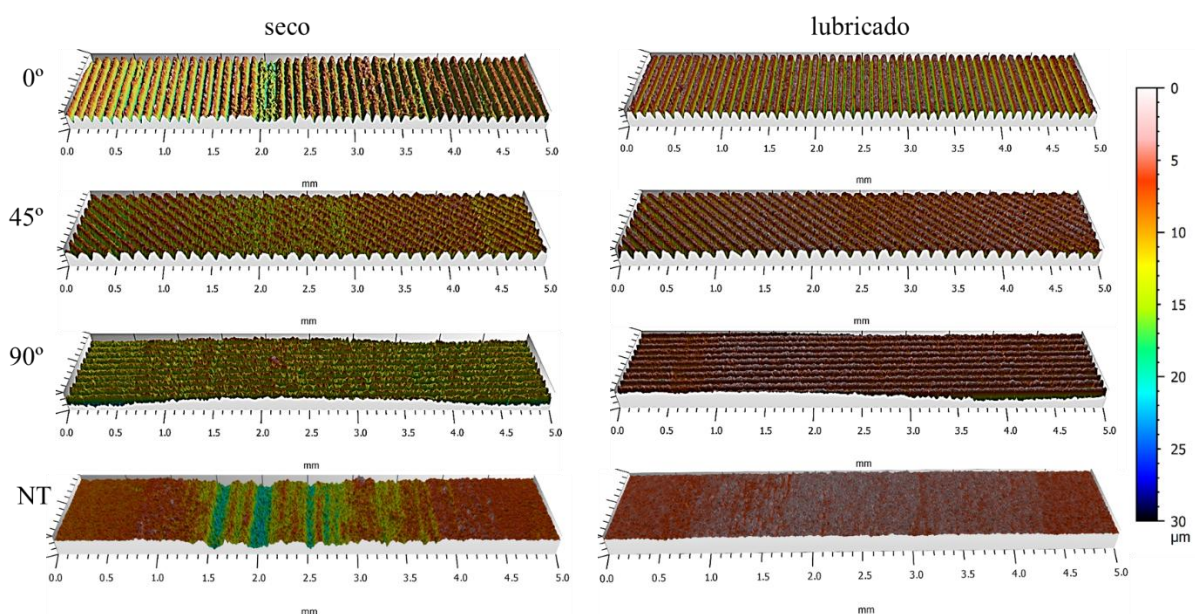


Figura 2: Topografías de las muestras analizadas bajo diferentes características de lubricación.

. En los ensayos a 45° se aprecia una disminución de la altura de los surcos en la dirección de deslizamiento, pero sin llegar a reducir por completo la textura. En los ensayos no texturizados, casi la totalidad de la huella ve reducida la profundidad siendo en estas muestras en las que se detecta un mayor desgaste por abrasión, alcanzando los valores más altos de profundidad.

Los ensayos realizados con deslizamientos orientados a 90° respecto a la textura presentan sin embargo una ligera adhesión de material sobre las texturas, especialmente en la parte central de las muestras. La variación de comportamiento con esta textura específica puede estar relacionada con la función de evacuación de partículas de desgaste de los canales generados. En este caso, los restos de WC-Co pasan automáticamente a los canales sin adherirse con tanta facilidad al pin y reduciendo el desgaste por abrasión generado. En los casos anteriores, estas partículas pueden verse atrapadas en la zona de desgaste generando el desgaste abrasivo por tres cuerpos, especialmente significativo en las muestras sin texturizar y con un efecto reducido en las muestras desgastadas a 45° ya que los canales permiten una leve evacuación de las partículas abrasivas. En los ensayos lubricados, no se aprecia esta circunstancia ya que el propio lubricante atrapa este tipo de partículas y evita los procesos adhesivos entre el pin y la superficie disminuyendo el desgaste por deslizamiento intermitente y por tanto el arranque de partículas de WC-Co.

Este fenómeno se aprecia mejor en los datos de rugosidad media aritmética (S_a), representados en la Figura 3 y de altura reducida de pico (S_{pk}), representados en la Figura 4.

Por un lado, el parámetro S_a indica la altura media de la rugosidad de la superficie, al tratarse de texturas de baja profundidad, es un buen indicador del efecto del ensayo de fricción sobre la geometría de la misma. En este caso se aprecia como en las texturas a 0° y 45° , S_a se ve reducida por los efectos abrasivos que eliminan parte de la textura generada y por tanto el valor medio de la superficie. Por el contrario, en los ensayos realizado sobre las superficies NT, S_a aumenta considerablemente debido a los surcos producidos por el abrasivo y compararse frente a valores de superficie casi especular. Para los ensayos a 90° , no se aprecia una diferencia significativa entre los resultados obtenidos. Por otro lado, en los ensayos lubricados, los resultados son mucho más homogéneos, replicando el comportamiento previamente descrito pero con variaciones a menor escala en el caso de las superficies NT.

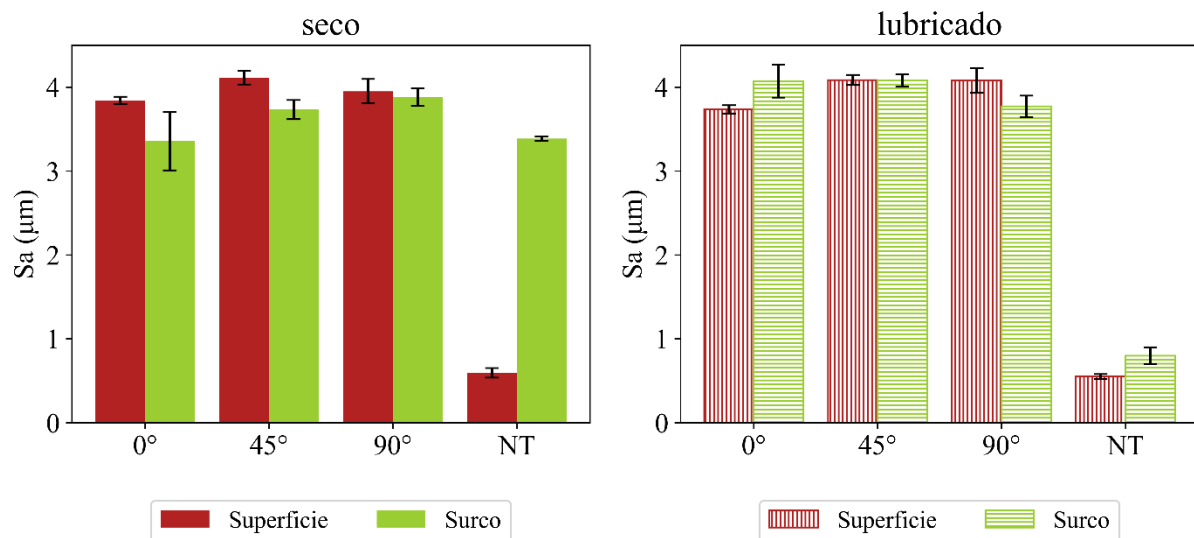


Figura 3: S_a dentro y fuera del surco para condiciones en seco y lubricado.

Por otro lado, el parámetro S_{pk} , que indica la cantidad de picos que son propensos a ser eliminados en condiciones de desgaste. Este valor aumenta dentro del surco debido a las irregularidades generadas en la huella por abrasión incontrolada y pequeñas capas de adhesión de Ti. En seco, este valor aumenta debido a la generación de canales abrasivos que cambian la morfología de las muestras. Sin embargo, para condiciones lubricadas este parámetro, en términos generales se reduce debido a la adhesión de material, que sutilmente homogeniza la superficie de la textura.

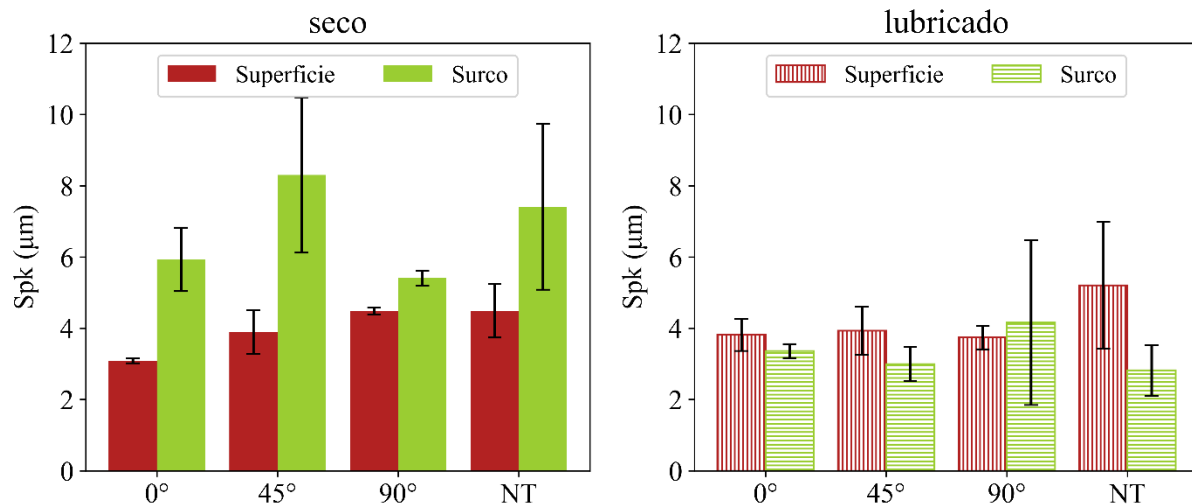


Figura 4: Spk dentro y fuera del surco para condiciones en seco y lubricado.

3.2. Desgaste del Ti

Para la caracterización del desgaste ocasionado en el pin se han evaluado los pines siguiendo tres métodos, variación de masa (aplicando la ecuación 1), variación de longitud y registro de la posición en Z del cabezal del tribómetro. Los resultados obtenidos están representados en la Figura 3. Los distintos métodos de medición generan una variación de resultados siendo los valores de masa los intermedios para la mayor parte de los ensayos. De media la medida de longitud da valores un 15% inferiores a los de peso y un 16% mayores en los registro de posición del cabezal. La menor pérdida del pin se registra para los ensayos NT en seco, obteniendo valores algo mayores pero similares entre sí para las muestras texturizadas en seco. Los ensayos lubricados generan una mayor reducción del tamaño del pin, eliminando una mayor cantidad de Ti. En estos últimos, las variaciones registradas entre los distintos métodos son inferiores, especialmente cuando se comparan la medición del peso y la longitud. Igualmente, las desviaciones entre los resultados del registro de la máquina y la masa son inferiores debido a una reducción de las variaciones por desgaste de la superficie de WC-Co.

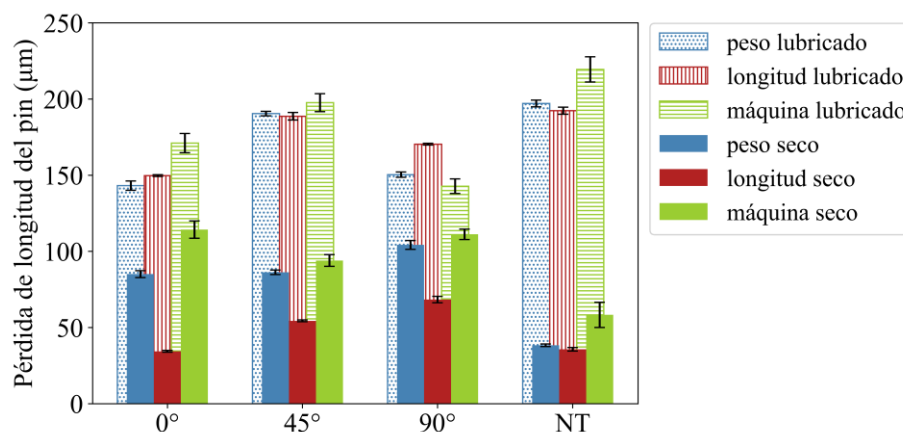


Figura 5: Topografías de las muestras analizadas bajo diferentes características de lubricación.

En casi todos los casos los valores registrados por el sistema de posicionamiento del tribómetro son mayores, alcanzando variaciones de hasta un 52%, debido a la medición de varios fenómenos. En esta medida registra in situ tanto la reducción de longitud del pin como los cambios ocurridos en la superficie de las muestras midiendo las variaciones ocasionadas por adhesión y abrasión a lo largo de todo el recorrido (Figura 4). Este registro incorpora en las mediciones el aumento de la profundidad del surco y también presenta variaciones mayores en término de desviación estándar al tratarse de medidas dinámicas realizadas durante el ensayo tribológico. Este método, por tanto, permite evaluar automáticamente, pero de forma aproximada, el desgaste uniendo los efectos obtenidos en el pin y el surco. Este método es por tanto una alternativa a las medidas ex situ y facilita una primera aproximación de los resultados obtenidos.

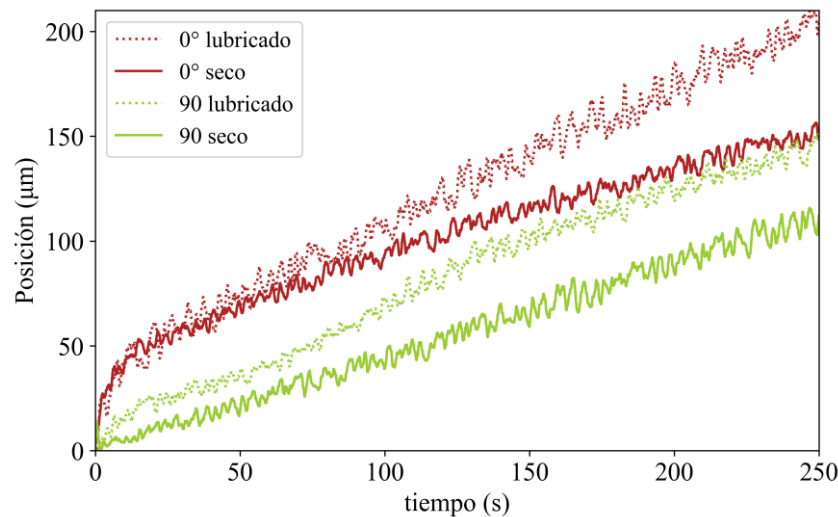


Figura 6: Ejemplo de registro de medición de la posición en Z del tribómetro.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto una alternativa al estudio del efecto de las texturas en herramientas de corte para el mecanizado de Ti mediante la realización de ensayos tribológicos plano sobre plano. Estos ensayos han permitido analizar la influencia de la orientación de los surcos frente al deslizamiento de los que se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las texturas pueden reducir la abrasión en ciertas orientaciones, mientras que la lubricación disminuye la adhesión y el desgaste por abrasión. Las texturas a 90° favorecen la evacuación de partículas y reducen la abrasión mejorando el comportamiento de la textura especialmente en condiciones lubricadas.
- Las variaciones obtenidas en las huellas de desgaste se han evaluado mediante los parámetros Sa y Spk para analizar los cambios en la textura tras el desgaste.
- En seco, el mecanismo de desgaste predominante es la abrasión y bajo lubricación pequeñas capas de adhesión de titanio aparecen sobre la superficie de WC-Co.
- El pin es la muestra con mayor desgaste, que se ve incrementada en los ensayos lubricados. Esta variación se ha medido usando tres metodologías: peso, longitud y posición Z del cabezal del tribómetro, siendo la medición de la posición en Z del tribómetro registra valores superiores, reflejando efectos combinados de abrasión y adhesión.
- La posición en Z ofrece una visión más completa del desgaste en tiempo real, aunque con mayor variabilidad, siendo una alternativa útil a las mediciones ex situ.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del ministerio MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y ERDF/EU [PID2022-138872OB-I00 y EQC2019-005674-P].

5. Referencias

- [1] S.R. Oke, G.S. Ogunwande, M. Onifade, E. Aikulola, E.D. Adewale, O.E. Olawale, B.E. Ayodele, F. Mwema, J. Obiko, M.O. Bodunrin, "An overview of conventional and non-conventional techniques for machining of titanium alloys," *Manuf. Rev.*, 7 (2022) 34. <https://doi.org/10.1051/MFREVIEW/2020029>
- [2] J.P. Davim, *Materials Forming, Machining and Tribology*, first ed., Springer, Switzerland, 2022.
- [3] A. Pramanik, *Machining and Tribology: Processes, Surfaces, Coolants, and Modeling*, first ed., Elsevier, Amsterdam, 2022.
- [4] ASM Handbook Vol. 16: *Machining*, first ed., ASM International, USA, 1989.

- [5] M. Nouari, G. List, F. Giro, D. Coupard, "Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys," *Wear*, **255** (7–12) (2003) 1359–1368. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00105-4)
- [6] J. Salguero, M. Batista, J.A. Sánchez, M. Marcos, "An XPS study of the stratified built-up layers developed onto the tool surface in the dry drilling of Ti alloys," *Adv. Mat. Res.*, **223** (2011) 564–572. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.564>
- [7] M. Hourmand, A.A.D. Sarhan, M. Sayuti, M. Hamdi, "A comprehensive review on machining of Titanium alloys," *Arab. J. Sci. & Eng.*, **46** (2021) 7087–7123. <https://doi.org/10.1007/S13369-021-05420-1>
- [8] W. Di, C. Shuqing, "Study on the influence of chip break groove front angle on the performance of cutting Ti6Al4V," *8th Int. Conf. Int. Inf. & Biomed. Sci.*, (2023) 357–360. <https://doi.org/10.1109/ICIIBMS60103.2023.10347747>
- [9] Ş. Altinsoy, N.B. Üllen, M. Ersoy, D. Can, "Machining performance of uncoated and carbide coated cutting inserts in Ti6Al4V turning: An experimental and numerical approach," *J. Mat. Eng. & Perform.*, (2024) 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09788-7>
- [10] M. Soori, B. Arezoo, "The effects of coolant on the cutting temperature, surface roughness and tool wear in turning operations of Ti6Al4V alloy," *Mech. Based Des. Struc. & Mach.*, **52**(6) (2023) 3277–3299. <https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2200832>
- [11] M. Ganesh, N. Arunkumar, "A sustainable approach in deep hole drilling of Ti6Al4V: Effect of cryogenic cooling on hole parameters and its evaluation," *J. Manuf. Proc.*, **121** (2024) 343–360. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.05.048>
- [12] Y. Chen, J. Wang, M. Chen, "Enhancing the machining performance by cutting tool surface modifications: A focused review," *Mach. Sci. & Tech.*, **23** (2019) 477–509. <https://doi.org/10.1080/10910344.2019.1575412>
- [13] A. Arslan, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, M. Varman, R.A. Mufti, M.H. Mosarof, L.S. Khuong, M.M. Quazi, "Surface texture manufacturing techniques and tribological effect of surface texturing on cutting tool performance: A review," *Crit. Rev. Sol. Sta. & Mat. Sci.*, **41** (2022) 447–481. <https://doi.org/10.1080/10408436.2016.1186597>
- [14] Z. Kang, M.B.G. Jun, Y. Fu, "Performance of cemented carbide cutting tools with volcano-like texture on rake face," *ASME 13th Int. Manuf. Sci. & Eng. Conf.*, (2018) V004T003A009. <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6311>
- [15] P. Sivaiah, U. Bodicherla, "Effect of surface texture tools and minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in CNC turning of AISI 52100 steel," *J. Inst. Eng. India Ser. C*, **101**(1) (2020) 85–95. <https://doi.org/10.1007/s40032-019-00512-2>
- [16] T. Ibatan, M.S. Uddin, M.A.K. Chowdhury, "Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders," *Surf. & Coat. Tech.*, **272** (2015) 102–120. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.017>
- [17] A.O. Ijaola, E.A. Bamidele, C.J. Akisin, I.T. Bello, A.T. Oyatobo, A. Abdulkareem, P.K. Farayibi, E. Asmatulu, "Wettability transition for laser textured surfaces: A comprehensive review," *Surf. and Interf.*, **21** (2020) 100802. <https://doi.org/10.1016/j.surfinter.2020.100802>
- [18] J.M. Vázquez, J. Salguero, I. Del Sol, "Texturing design of WC-Co through laser parameter selection to improve lubricant retention ability of cutting tools," *Int. J. Refrac. Met. & Hard Mater.*, **107** (2022) 105880. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105880>
- [19] Y. Lian, H. Chen, C. Mu, J. Deng, S. Lei, "Experimental investigation and mechanism analysis of tungsten disulfide soft-coated micro-nano textured self-lubricating dry cutting tools," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.*, **5** (2018) 219–230. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0022-9>
- [20] P. Fernández-Lucio, G. Urbikain, S. Plaza, U. Ukar, O. Pereira, "Enhancement of ceramic tool behavior with textured grooves during machining of Inconel 718," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **134** (2024) 2955–2968. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14222-2>
- [21] N.T. Alagan, P. Zeman, P. Hoier, T. Beno, U. Klement, "Investigation of microtextured cutting tools used for face turning of alloy 718 with high-pressure cooling," *J. Manuf. Process.*, **37** (2019) 606–616. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.023>
- [22] A.R. Machado, L.R.R. da Silva, F.C.R. de Souza, R. Davis, L.C. Pereira, W.F. Sales, W. de Rossi, E.O. Ezugwu, "State of the art of tool texturing in machining," *J. Mat. Proc. Tech.*, **293** (2021) 117096. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117096>

- [23] D. Arulkirubakaran, V. Senthilkumar, S. Dinesh, C. Velmurugan, N. Manikandan, R. Raju, "Effect of textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy under lubricant condition," *Mater. Today Proc.*, **5**(6-2) (2018) 14230–14236. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.03.003>
- [24] X. Liu, Y. Liu, L. Li, Y. Tian, "Performances of micro-textured WC-10Ni3Al cemented carbides cutting tool in turning of Ti6Al4V," *Int. J. Refract. Metals & Hard Mater.*, **84** (2019) 104987. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.104987>
- [25] K. Patel, G. Liu, S.R. Shah, T. Özel, "Effect of micro-textured tool parameters on forces, stresses, wear rate, and variable friction in Titanium alloy machining," *J. Manuf. Sci. & Eng. – Trans. ASME*, **142** (2020) MANU-19-1071. <https://doi.org/10.1115/1.4045554>
- [26] N.A. Sristi, P.B. Zaman, "A review of textured cutting tools' impact on machining performance from a tribological perspective," *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, **133** (2024) 4023–4057. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13865-5>
- [27] J. Salguero, et al., "Application of Pin-On-Disc techniques for the study of tribological interferences in the dry machining of A92024-T3 (Al-Cu) alloys," *Materials*, **11**(7) (2018). <https://doi.org/10.3390/MA11071236>
- [28] P.C. Verma, R. Ciudin, A. Bonfanti, A. Pranesh, G. Straffellini, S. Gialanella, "Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material," *Wear*, **346–347** (2016) 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.004>
- [29] P. Zhang, L. Zhang, D. Wei, P. Wu, J. Cao, C. Shijia, X. Qu, "Substance evolution and wear mechanism on friction contact area of brake disc for high-speed railway trains at high temperature," *Engineering Failure Analysis* **111** (2020) 104472. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104472>
- [30] R. Khuengpukheiw, A. Wisitsoraat, C. Saikaew, "Wear behaviors of HVOF-sprayed NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB and WC-Co coatings evaluated using a pin-on-disc tester with C45 steel pins," *Wear* **484–485** (2021) 203699. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203699>
- [31] J. Salguero, I. Del Sol, J.M. Vazquez-Martinez, M.J. Schertzer, P. Iglesias, "Effect of laser parameters on the tribological behavior of Ti6Al4V titanium microtextures under lubricated conditions," *Wear*, **426–427** (2019) 1272–1279. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.029>
- [32] P.K. Kumar, A.S. Kumar, "Investigation of frictional characteristics of laser textured aluminium 6061 and aluminium 7071 alloys under dry sliding conformal contact in pin on disc tribometer," *Materials Today: Proceedings*, **45** (2021) 670–676. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.735>
- [33] I. Velkavrha, M. Lüchinger, K. Kern, S. Klien, F. Ausserer, J. Voyer, A. Diem, M. Schreiner, W. Tillmann, "Using a standard pin-on-disc tribometer to analyse friction in a metal forming process," *Tribology International*, **114** (2017) 418–428. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.052>
- [34] ASTM International, "Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear," ASTM G133-22, West Conshohocken, PA, 2022.
- [35] J. Salguero, et al., "A comparative study of disk wear volume evaluation of AL2024 based on ASTM G99," *Proceedings of ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2022*, **9**, Amer Soc Mechanical Engineers, 2022.