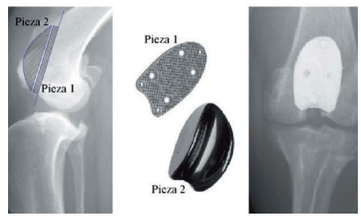
Micromecanizado de un material biocompatible para la producción de prótesis: tántalo de 99,9% de pureza



Micro-machining of a bio-compatible material for prosthesis production: 99.9% purity tantalum

Andrés-Guillermo Guasca-González, Anderson-Junior dos-Santos, Wanderson de Oliveira Leite, Juan-Carlos Campos-Rubio y Francisco Mata-Cabrera

Universidade Federal de Minas Gerais. Escuela de Ingeniería. Avenida Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte (Brasil).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9158 | Recibido: 13/03/2019 • Inicio Evaluación: 26/03/2019 • Aceptado: 20/08/2019

ABSTRACT

• During the last decades, micromilling has been widely researched for a wide variety of materials. However, the behavior of many materials has not yet been studied in the micro-machined area. Among these materials we can highlight those that have wide applications in industries such as aerospace, nuclear and biomedical. Within these last ones those biocompatible materials are the focus of this work. Thanks to its high melting point and its high resistance to corrosion, tantalum can have diverse applications in the above mentioned areas. In this paper we present the study of the cutting forces, mainly in the feed direction, and the acoustic emission in the micro-milling of 99.9 % purity tantalum with cemented carbide tools without coating and with two different coatings, (Ti,Al) N and DLC. The diameter of the tools was 500 µm, the cutting speed and the cutting depth of the test were kept constant with values of 63 m/min and 40 µm respectively, while 6 feed rates were in order to observe the influence of the critical undeformed chip thickness in the micro-milling operation. The recorded emission acoustic results allowed to identify the value of minimum chip thickness for each tool, while the power spectrum density results allowed to identify dominant frequencies of machining for different feeds per tooth. Regarding the feed force, it was possible to identify a minimum value for each tool as function of feed rate and the specific cutting force values showed the typical nonlinear behavior of the size effect.

• **Keywords:** micro-milling, tantalum, acoustic emission, cutting forces, specific cutting force.

RESUMEN

Durante las últimas décadas el micro-fresado ha sido ampliamente investigado para una gran diversidad de materiales. Sin embargo, el comportamiento de muchos materiales cuando son micro-mecanizados aún no ha sido estudiado en su totalidad. Entre estos materiales se pueden resaltar aquellos nuevos materiales que tienen amplias aplicaciones en industrias como la aeroespacial, nuclear y biomédica como el tántalo. Gracias a su alta temperatura de fusión y su alta resistencia a la corrosión, el tántalo puede tener diferentes aplicaciones en las áreas mencionadas y los últimos años en el área de medicina con materiales biocompatibles. Así, en este trabajo se presenta el estudio del micro-fresado de tántalo de 99.9 % de pureza, analizando sus fuerzas de corte, principalmente en la dirección del avance, y la emisión acústica de las herramientas de carburo cementado sin recubrimiento y con dos recubrimientos diferentes ((Ti,Al)N y DLC), con un diámetro de 500 µm. La velocidad y la profundidad de corte de los ensayos se mantuvieron constantes con valores de 63 m/min y 40 µm respectivamente, mientras se dispusieron 6 avances por diente diferentes con el propósito de observar la influencia del espesor crítico de corte en la operación de micro-fresado. Los resultados registrados de emisión acústica permiten determinar el valor de espesor crítico de corte para cada una de las herramientas, mientras que los resultados de la función densidad espectral de energía sirven para identificar frecuencias dominantes de mecanizado para los distintos avances por diente. Finalmente, por análisis de las fuerzas de avance se ha podido identificar un valor mínimo para cada una de las herramientas con respecto al avance mientras la fuerza específica de corte calculada muestra el comportamiento no lineal típico del efecto escala.

Palabras clave: micro-fresado, tántalo, emisión acústica, fuerzas de corte, fuerza específica de corte.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el crecimiento de la necesidad de miniaturización de diversos equipos y dispositivos ha sido continuo y eso ha favorecido que operaciones de fabricación como el micro-fresado hayan sido estudiadas más extensamente. En estos estudios, se han investigado gran cantidad de materiales y herramientas, sin embargo, materiales metálicos biocompatibles considerados de difícil mecanizado, como algunas aleaciones de titanio, de níquel y de tántalo y algunas de sus aleaciones [1–3] no se han estudiado de manera profusa. El tántalo, además de la biocompatibilidad demostrada desde antes de la mitad del siglo pasado [4], ha demostrado tener excelentes propiedades osteoconductoras, una mayor resistencia a la fatiga y permitir una mayor deformación plástica cuando se compara con una de las aleaciones más usadas en la fabricación de prótesis, el Ti6Al4V [5]. No obstante, a pesar de las ventajas ya mencionadas del tántalo, el microfresado de este material aún no ha sido estudiado como una alternativa para la fabricación de prótesis, siendo muy escasa la información disponible sobre su proceso de microfresado y sobre su desempeño en prótesis.

Con respecto al microfresado de materiales de estructuras similares, hay distintas investigaciones realizadas con diversos materiales y herramientas, las cuales demuestran que la emisión acústica (EA), las fuerzas de corte y la fuerza específica de corte

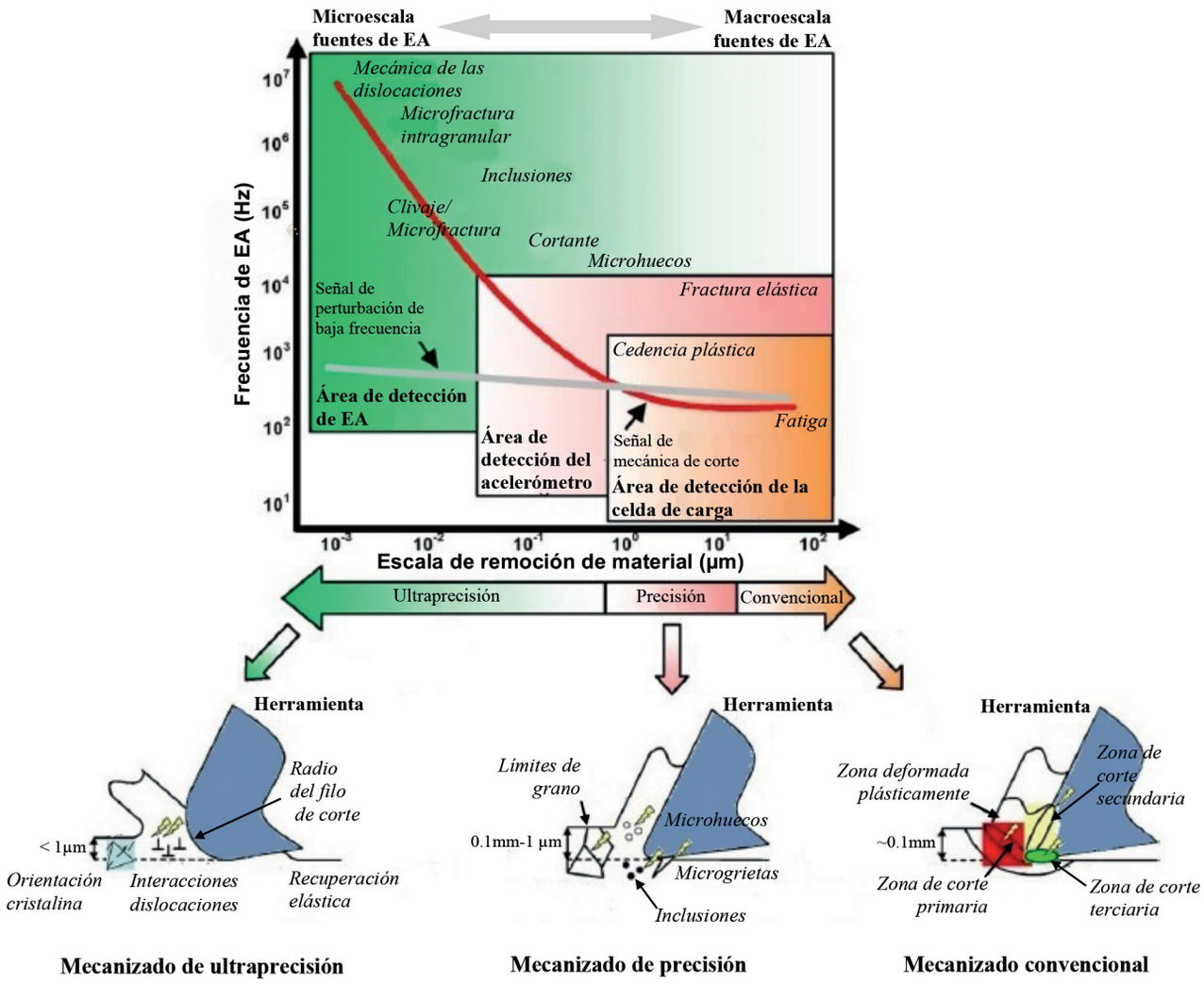


Fig. 1: Fuentes de EA en diferentes niveles de remoción de material [17]

(k_S) son las variables representativas en el conocimiento y la monitorización de esta operación de fabricación [6–13]. Además, los problemas que principalmente se presentan en el proceso de mecanizado de estos materiales son la formación de filo aportado, el desgaste temprano de la herramienta y la baja calidad superficial.

Mientras en el fresado convencional el radio del filo de corte (ρ) siempre es mucho menor que el espesor de viruta sin deformar (h), en el micro-fresado, se pueden presentar tres situaciones diferentes. En la primera ρ es menor que h, por lo que se presenta el fenómeno de surcado (*ploughing*) en el cual no existe formación de viruta, ocurriendo solamente una deformación que provoca compresión sobre la superficie de la pieza seguida de una recuperación elástica. La segunda ocurre cuando ρ es igual a h, aquí una parte del material es removido como viruta, otra fracción se recupera elásticamente y parte sufre deformación plástica. La tercera acontece si ρ es mayor que h, presentándose la condición única de formación de viruta [14]. Lo anterior establece un valor de espesor crítico de corte (h_C) con el cual se puede identificar un punto de transición entre la condición de surcado y la condición única de formación de viruta. Lo descrito en este párrafo se relaciona con el efecto escala, que se define como el incremento no lineal de k_S con la disminución de h [15], por lo que con valores de h menores a h_C se debe observar valores mayores de k_S.

La EA se define como la radiación de las ondas mecánicas elásticas producidas por un material debido al reordenamiento local dinámico de su estructura interna [16] y ha venido tomando gran relevancia para analizar varios fenómenos asociados a la remoción de material, particularmente en la escala micro [17]. Las señales de EA son adecuadas para caracterizar el mecanizado en rangos de longitud muy pequeños, cerca del espesor mínimo de corte[18]. Diversas fuentes de la señal de EA se pueden ver en la Fig. (1) para diferentes escalas de remoción de material, desde el mecanizado convencional hasta el mecanizado de ultraprecisión, pasando por el mecanizado de precisión que incluye al micro-mecanizado. Justamente en el microfresado, Câmara *et al.* [6] lograron identificar h_C para diversos materiales de pieza, encontrando que el valor de intensidad de EA fue mayor cuando el avance por diente (f_Z) fue menor a h_C estimado por medio del modelo de Son *et al.* [7]. En este modelo, h_C se calcula en función de ρ y del coeficiente de fricción (β) entre el material de la pieza y el material de la herramienta, como se muestra en la Ec. (1).

$$h_C = \rho\left(1-\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\beta}{2}\right)\right) \quad (1)$$

Algunos investigadores desmostaron que el análisis en frecuencia de la señal de EA permite identificar bandas de frecuencia predominantes en el mecanizado. Ferrer *et al.* identificaron para adherencia y arrastre la banda de 25 – 110 kHz [19]; para cizallamiento, Marinescu *et al.* la de 70 – 115 kHz [20] y para surcado, Baranov *et al.* la de 150 – 200 kHz [16].

En el caso de las fuerzas de corte, además de ser consideradas como instrumentos de monitorización del micro-fresado, también se han utilizado para el modelado de la operación. Vogler *et al.*

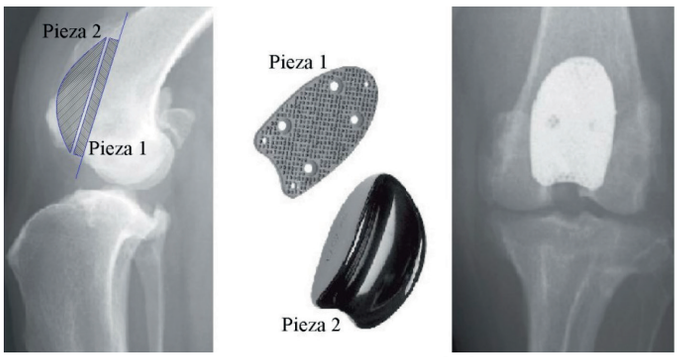


Fig. 2: Ejemplo de cirugía de reconstrucción patelar [28]

[21] mostraron la relación de las fuerzas de corte con variables como h_C y ρ teniendo en cuenta que cuando h es menor que h_C se presenta deformación elástica y cuando h es mayor que h_C se presenta plasticidad de la línea de deslizamiento. Otro modelo mostró que para un mejor entendimiento del microfresado a través del cálculo de las fuerzas de corte es necesario evaluar el efecto escala, ρ, y h_C [9]. Afazov *et al.* [10] mostraron que el efecto escala es una variable importante en el cálculo de las fuerzas de corte en el microfresado de Ti6Al4V, mientras que Li y Wu [22] demostraron la relevancia de considerar el efecto del surcado y del ρ para calcular las fuerza de corte y la k_S en función del h. En los trabajos anteriores es evidente la relación existente entre las fuerzas de corte en el microfresado con variables como h, h_C y ρ, por lo que analizar estas últimas es de bastante trascendencia; tanto es así, que Li *et al.* [23] buscando mejorar el modelado de las fuerzas de corte, calcularon el h instantáneo en el microfresado.

La k_S se define como la fuerza de corte por unidad de área del material removido y depende en un principio del material que se está cortando [24]. Esta variable se relaciona con los bordes de las bandas de deslizamiento observadas a lo ancho de la viruta, que tienen una extensión característica de un espaciamiento de una imperfección, por lo que el volumen de material deformado estaría próximo al volumen promedio de una imperfección y esa sería la razón principal por la que k_S aumenta con la reducción del espesor de material sin deformar [25]. Algunos autores trabajan con la energía específica de corte [11–12] y otros con la presión específica de corte [13]. Independientemente de la variable utilizada, se puede observar que este parámetro es un indicativo del efecto escala, para lo cual k_S presenta un comportamiento no lineal, presentando mayores valores para menores valores de avance [9, 12, 22, 26–27].

Para la fabricación de prótesis es importante conocer las particularidades del mecanizado de materiales biocompatibles como el tántalo, debido al alto costo de este material. Por ello, se pretende evaluar la maquinabilidad del tántalo de 99.9% de pureza, teniendo en cuenta el h_C y el efecto escala, por medio del registro de datos de EA y fuerzas de corte; y el análisis en frecuencia de los datos de EA mediante el cálculo de la densidad espectral de energía (*power spectrum density*, PSD) y de la k_S. Además, se pretende evaluar también la influencia de los recubrimientos de la herramienta en las variables de análisis usadas en este trabajo. Todo esto con el propósito a futuro de fabricar una placa de soporte para fijación de prótesis en cirugías de reconstrucción patelar (pieza 1 en la Fig. (2)).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de medir los valores del ρ y verificar el material del recubrimiento de las micro-fresas de corte se usó el microscopio de barrido de electrones modelo JSM 6490-LV (JOEL, Tokio, Japón) de la Universidad de los Andes en Bogotá, Colombia.

V_c (m/min)	63					
a_P (μm)	40					
f_Z (μm/diente)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2

Tabla 1: Parámetros de corte seleccionados

Para el micro-fresado de tántalo de 99.9 % de pureza se utilizaron herramientas de carburo cementado sin recubrir y recubiertas de carbono tipo diamante (DLC, por sus siglas en inglés) y de nitruro de titanio-aluminio ((Ti,Al)N). Las herramientas sin recubrimiento y las recubiertas de DLC fueron de referencia C2SSD050 (MITSUBISHI MATERIALS, Hyogo, Japón) y el recubrimiento de DLC fue realizado por BALZERS (OERLIKON BALZERS Revestimentos Metálicos, Sao Paulo, Brasil). La herramienta con recubrimiento de (Ti,Al)N fue de referencia R216.32-00530-AE05G (SANDVIK, Estocolmo, Suecia). La selección de este material de herramienta se basó en que ya había sido utilizado en el torneado de tántalo, aleaciones de níquel y aleaciones de titanio [1], mientras que el recubrimiento de DLC ya mostró menores fuerzas de corte y mejor acabado superficial en aleaciones de difícil mecanizado como la Inconel 718 [29]. Además, este recubrimiento presentó menores coeficientes de fricción en el mecanizado intermitente de la aleación de aluminio 5052, que al igual que el tántalo, es reconocida por su gran ductilidad [30]. De la misma manera el recubrimiento de (Ti,Al)N es usado en el mecanizado de materiales de difícil mecanizado como aleaciones de níquel [31] y aleaciones de titanio [32]. Todas las herramientas mencionadas tenían un diámetro de 500 μm y ángulo de hélice de 30°. La velocidad de corte (v_C), la profundidad de corte (a_P) y los f_Z de los ensayos se presentan en la Tabla 1. En el caso de los avances utilizados en este trabajo, fueron calculados a partir del análisis de la Ec. (1) usando como variable de entrada el ρ medido en el microscopio de barrido de electrones para cada una de las herramientas.

Para alcanzar la v_C mencionada anteriormente se usó la turbina neumática AIR TURBINE TOOLS modelo 650BT40 (AIR TURBINE TECHNOLOGY, INC, Boca Ratón, E.U.A.) montada en el centro de mecanizado ROMI modelo DISCOVERY 560 de 9kW de potencia (INDUSTRIAS ROMI S. A., São Paulo, Brasil). Para colectar los datos de la señal de emisión acústica fue usado el sensor MCWADE MONITORING NS3300 de 150kHz (nominal de 100kHz a 200kHz) (MCWADE MONITORING SYSTEMS, Lancaster, Reino Unido) y el dinamómetro KISTLER modelo 9272 con su respectivo amplificador de señal KISTLER modelo 5073 (KISTLER GROUP, Winterthur, Suiza). Las señales de EA, fuerza en la dirección del avance (F_X), fuerza de apoyo (F_Y) y fuerza axial (F_Z) se registraron usando la placa de adquisición de datos NATIONAL INSTRUMENTS modelo 6366 y el software SIGNALEXPRESS 2015 (NATIONAL INSTRUMENTS, Austin, E.U.A). La Fig. (3) muestra parte del montaje para realizar los experimentos. Todos los ensayos de micro-fresado de tántalo fueron realizados en el Laboratorio de Mecanizado y Automatización de la Universidade Federal de Minas Gerais en Belo Horizonte, Brasil.

Además de los valores de intensidad de emisión acústica y de fuerzas de corte registrados, se calcularon los valores de la media cuadrática (RMS) de EA en función del f_Z y también se calculó la transformada de densidad espectral de energía de la señal de EA por medio del software SIGNALEXPRESS 2015. Para el caso de la PSD se utilizaron los datos de EA registrados durante 1 s. Ya con los valores de fuerza corte se calculó la k_S usando la F_X y el área de la sección transversal de corte.

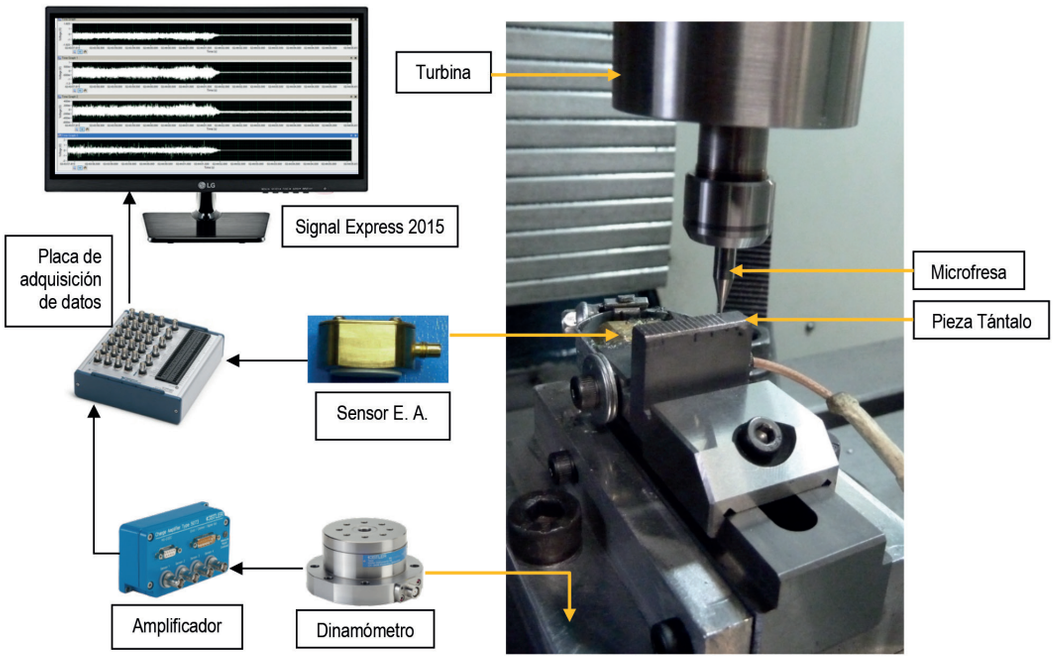


Fig. 3: Configuración experimental para los ensayos de microfresado de tántalo

3. RESULTADOS

A partir de las imágenes tomadas en el microscopio electrónico de barrido se determinaron los ρ de las herramientas usadas en este trabajo. La Fig. (4) muestra una de las imágenes tomadas para calcular el ρ de la micro-fresa revestida de (Ti,Al)N. Y para la herramienta recubierta de DLC y la herramienta sin recubrimiento el ρ fue de 4.14 µm y 4.25 µm respectivamente.

Los resultados RMS de la señal de intensidad de EA para las distintas herramientas usadas en este estudio se muestran en la Fig. (5). Se pudo observar que el valor mínimo de EA en relación a f_z en la herramienta recubierta de (Ti,Al)N se presentó en 1 µm, en la recubierta de DLC en 0.4 µm y en la herramienta sin recubrir en 0.6 µm. Estos valores mínimos de EA se pueden asociar al h_c. Pese a que los valores mínimos de EA presentaron pequeñas diferencias (máximo del 12%), se puede resaltar que el menor valor de intensidad de EA se presentó con la herramienta recubierta de (Ti,Al)N. También es posible destacar que los mayores valores de EA se registraron para la herramienta sin recubrimiento, en particular, para f_z de 0.2 µm, 1 y 1.2 µm, lo que podría indicar la influencia del recubrimiento en la interacción entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte.

Debido a que la frecuencia nominal del sensor de EA es de 100 – 200 kHz, señales de orden superior o inferior son atenuadas al momento de registrar los valores de intensidad de EA. Sin embargo, las frecuencias menores de 100 kHz fueron tenidas en cuenta para calcular la densidad espectral de energía. Para las tres herramientas usadas en este trabajo, la menor densidad de energía expresada por la transformada PSD se presentó en los mismos valores de f_z donde la intensidad de EA fue la menor. Además, para estos valores mínimos de EA no fue posible identificar bandas de frecuencia dominantes como lo ejemplifica la Fig. (6) para la herramienta sin recubrir y avance de 0.6 µm.

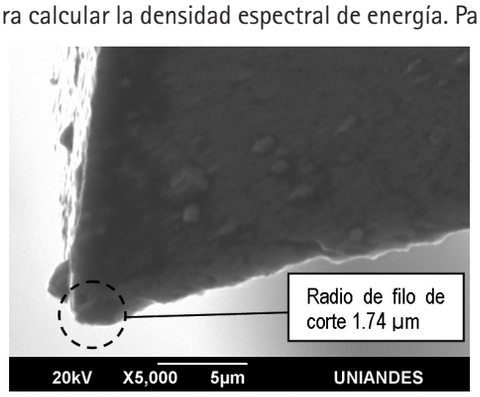


Fig. 4: a) Vista inferior de la micro-fresa de carburo cementado revestida de (Ti,Al)N y b) detalle del filo de corte

Para la herramienta recubierta de (Ti,Al)N la transformada PSD permitió identificar dos bandas de frecuencia con mayor densidad de energía, de 0 – 50 kHz y de 150 – 200 kHz, siempre que f_z fuera diferente de 1 µm. También para esta herramienta los picos de energía registrados en la transformada PSD fueron mayores cuando $f_z<h_c$, en particular para f_z de 0.2 µm y 0.8 µm.

En el caso de la herramienta recubierta de DLC los resultados de la PSD permitieron identificar frecuencias dominantes alrededor de los 100 kHz para los f_z de 0.2 µm, 0.6 µm y 0.8 µm, mientras que para el avance de 1 µm y 1.2 µm no fue posible identificar una frecuencia dominante. Cabe resaltar que el mayor pico de energía se registró para el menor avance y de la misma manera es importante mostrar que cuando f_z fue de 1.2 µm la menor densidad de energía se presentó en la banda de 150 – 200 kHz.

Para la herramienta sin recubrir, la transformada PSD mostró que para f_z de 0.2 µm y 0.8 µm las bandas dominantes fueron las de 50 – 75 kHz y de 100 – 150 kHz, como lo muestra la Fig. (6) para el avance de 0.2 µm. Mientras que en el caso de los avances de 0.4 µm, 1 µm y 1.2 µm la banda de frecuencia dominante fue de 50 – 100 kHz como lo presenta la Fig. (6) para el avance de 1.2 µm.

Las fuerzas de corte registradas en este trabajo fueron F_Z, que es la fuerza de mecanizado proyectada en la dirección del eje de la herramienta y que es perpendicular al plano de trabajo, F_X, que se define como la proyección de la fuerza de mecanizado sobre el plano de trabajo en la dirección del avance y F_Y, que se define como la proyección de la fuerza de mecanizado sobre el plano de trabajo y perpendicular a F_X [33]. En la Fig. (7) se presentan las fuerzas en la dirección del avance para las tres herramientas usadas. Se observó que el valor mínimo de F_X en relación a f_z en la herramienta recubierta de (Ti,Al)N se presentó en 0.6 µm, en la recubierta de DLC en 0.8 µm y en la herramienta sin recubrir en 0.6 µm. Se debe resaltar que sólo para esta última herramienta, la F_X y la intensidad de EA mínimas se presentaron en el mismo

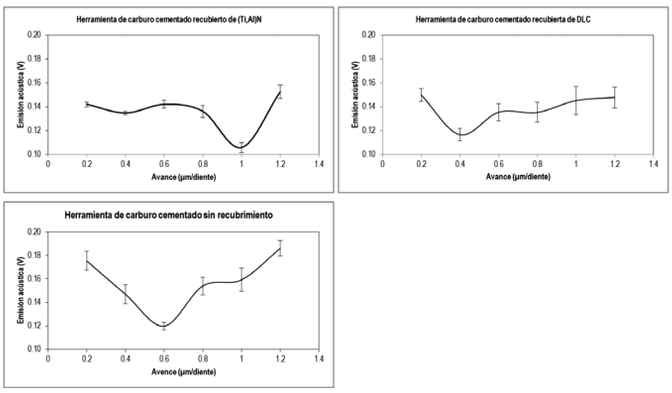


Fig. 5: Valores RMS de la señal de emisión acústica en función del f_z, v_c de 63 m/min y a_p de 40 µm

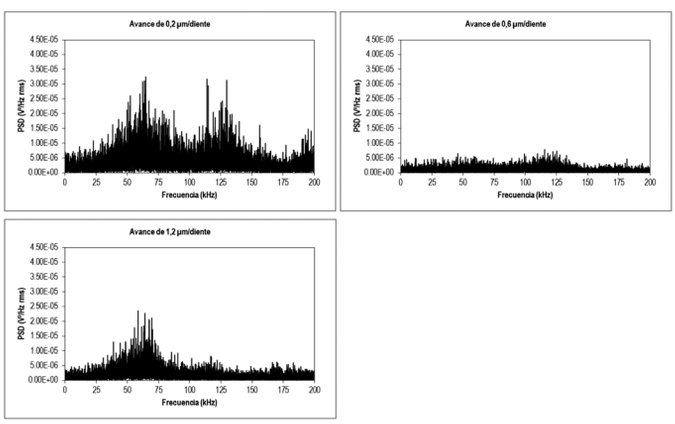


Fig. 6: Densidad espectral de energía de la señal de emisión acústica para diferentes f_z, calculados en el micro-fresado de tántalo con herramientas de carburo cementado sin recubrir, v_c 63 m/min y a_p 40 µm

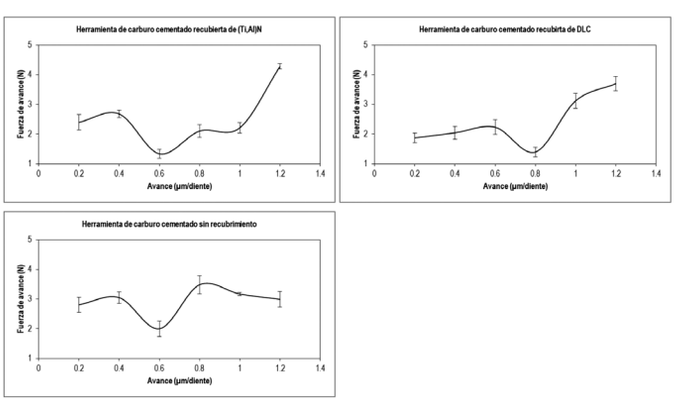


Fig. 7: RMS de la señal de F_X en función del f_z, v_c de 63 m/min e a_p de 40 µm.

valor de f_Z.

En lo que tiene que ver con F_Y, coincidió que el mínimo valor de esta fuerza se registró en el mismo f_Z registrado para los mínimos de F_X. En cambio, para F_Z los resultados mostraron un mínimo con respecto a f_Z sólo para la herramienta revestida de DLC en 0.8 µm y para la herramienta sin recubrir en 1 µm. También es importante resaltar que mientras F_X y F_Y para las tres herramientas estuvieron entre 0 – 5 N, los valores de F_Z para la herramienta recubierta de (Ti,Al)N fabricada por SANDVIK se registraron entre 5 – 8 N mientras que para las herramientas fabricadas por la MITSUBISHI MATERIALS se apuntaron entre 1 – 5 N. Esto podría ser un indicador de las diferencias geométricas que se presentan en las herramientas de distintos fabricantes.

La Fig. (8) muestra k_S calculada con los valores de F_X para las diferentes herramientas usadas en relación a f_Z. Se puede observar para la herramienta recubierta de (Ti,Al)N como k_S creció de 79943 N/mm² a 100622 N/mm² en cuanto f_Z pasa de 1.0 µm (valor de h_C para esta herramienta) a 0.8 µm. De la misma manera en la herramienta recubierta de DLC el valor de k_S creció de 240540 N/mm² a 408055 N/mm² mientras que f_Z cambió de 0.4 µm (valor de h_C para esta herramienta) a 0.2 µm. Finalmente, al igual que en las dos herramientas anteriores, para la herramienta sin recubrimiento, la k_S aumentó de 124498 N/mm² a 305655 N/mm² en cuanto f_Z pasó de 0.6 µm (valor de h_C para esta herramienta) a 0.4 µm. De la Fig. (8) también se puede resaltar que los valores de k_S en la franja de f_Z de 0.2 µm hasta 1.0 µm siempre fueron mayores para la herramienta sin recubrimiento al compararlos con los de las otras dos herramientas.

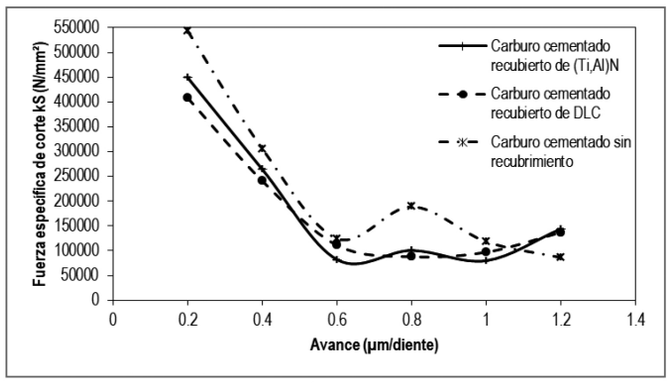


Fig. 8: k_S en función del f_z, v_c de 63 m/min y a_p de 40 µm.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha logrado obtener datos de variables importantes en el microfresado como el h_C y la k_S, a partir de los valores registrados de EA y fuerzas de corte. Las variables mencionadas contribuyen al estudio de la maquinabilidad del tántalo de 99.9% de pureza.

Por medio de los valores mínimos registrados de EA ha sido posible establecer valores de h_C diferentes para cada una de las herramientas usadas en este estudio. De acuerdo a Câmara [25], la mayor intensidad de EA para valores de $f_Z<h_C$ se debe a una mayor deformación plástica y elástica al material debajo de la arista de corte, que facilita la recuperación elástica del material. En esta condición el ángulo de desprendimiento efectivo es más negativo, que es lo que caracteriza al modo de surcado. Mientras que para $f_Z>h_C$, los valores de EA son mayores debido al aumento del área de sección transversal de corte y se evidencia el cizallamiento del material de la pieza [6]. El hecho de que h_C sea diferente para cada una de las herramientas usadas en este trabajo y que la intensidad de EA siempre fuera mayor para la herramienta sin recubrir para los f_Z distintos a los identificados como h_C, puede indicar la influencia del recubrimiento en la interacción entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte. Sin embargo, no se debe olvidar que variables como ρ generan alteraciones de la geometría de corte [8] que pueden afectar el valor de h_C por lo que se sugiere investigar en profundidad los efectos de los recubrimientos de la herramienta y de ρ en el microfresado del tántalo.

Ha sido posible identificar algunas bandas de frecuencia dominantes para ciertos f_Z en los resultados obtenidos de la transformada PSD, de acuerdo a lo planteado por [16, 19–20]. En la herramienta recubierta de (Ti,Al)N se han identificado frecuencias asociadas a adherencia y arrastre, y otras asociadas al surcado. En la herramienta de DLC en algunos avances se ha observado

la banda de frecuencia predominante característica del cizallamiento. Por último, en la herramienta sin recubrir se identificaron bandas de frecuencia preponderantes asociadas principalmente a adherencia y arrastre, y para algunos f_z a cizallamiento. Por lo anterior, no es posible asociar un modo característico de mecanizado a partir del análisis de la transformada PSD para los valores de f_z menores, iguales o mayores que h_c, pero si se pueden diferenciar las frecuencias predominantes para cada una de las herramientas usadas en este trabajo, siendo relevante el hecho de que la herramienta recubierta de DLC presentó una mayor condición de corte.

Para las fuerzas F_X y F_Y ha sido posible identificar un valor mínimo con respecto a los f_z utilizados en este trabajo. A pesar de que se observó la misma situación en los resultados de EA, los avances correspondientes a estos mínimos solo fueron coincidentes para la herramienta de carburo cementado sin recubrir, por lo que estos valores mínimos de F_X y F_Y no se pueden relacionar con h_c. Lo anterior se refuerza con los resultados obtenidos por otros investigadores cuando estudiaron materiales de difícil mecanizado. Por ejemplo, Lu *et al.* [34] microfresaron Inconel 718 con herramientas de carburo cementado recubierto y f_z de 0.1 – 3 µm, observando la presencia de un valor máximo de fuerza de corte para f_z, de 0.7 µm. Este último valor lo asociaron al valor de h_c. Contrario a lo descrito anteriormente, cuando Lai *et al.* [9] microfresaron cobre da alta conductividad térmica libre de oxígeno con herramientas de carburo cementado para f_z de 0.2 – 1.4 µm, registraron que los valores de F_X aumentaron con el incremento de f_z.

Los resultados de k_s mostraron un crecimiento no lineal de la misma con la reducción del h, que es como se define el efecto escala para los procesos de mecanizado por arranque de viruta [17, 35], por lo que se hace evidente que el microfresado de tántalo también es influenciado por el efecto escala.

Los resultados presentados en este trabajo abren un camino para la fabricación de prótesis de tántalo de 99.9% de pureza mediante el microfresado. Dentro de las alternativas para continuar esta investigación se sugiere evaluar el tipo y tamaño de rebarbas resultantes de la operación a través de imágenes de microscopia electrónica de barrido y valorar la calidad de la superficie fresada usando un perfilómetro. Lo anterior teniendo en cuenta los f_z superiores al h_c presentado en este trabajo para las herramientas utilizadas. Otra propuesta es profundizar en los efectos de los recubrimientos de las herramientas y evaluar la opción de usar otros revestimientos u otros materiales de herramienta. Otra proposición puede ser evaluar el desempeño de diferentes herramientas de corte cuando se usan fluidos de corte y distintas técnicas de lubri-refrigeración.

REFERENCIAS

[1] Wang Z, Rajurkar K. "Cryogenic machining of hard-to-cut materials". Wear. Vol.239-2 p.168–175. DOI: https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00361-0
[2] Biksa A. et al., "Wear behavior of adaptive nano-multilayered AlTiN/MexN PVD coatings during machining of aerospace alloys". Tribol. Int. Vol.43-8. p.1491–1499. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.02.008.
[3] Kim JS, Kim JW, Lee SW "Experimental characterization on micro-end milling of titanium alloy using nanofluid minimum quantity lubrication with chilly gas". Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol.91–5–8. p.2741–2749. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-016-9965-6
[4] Black J. "Biological performance of Tantalum". Clin. Mater. Vol.16. p.167–173. DOI: https://doi.org/10.1016/0267-6605(94)90113-9
[5] Wauthle R, van-der-Stok J, Yabari S et al. "Additively manufactured porous tantalum implants". Acta Biomaterialia. Vol.14. p.217–225. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.12.003
[6] Câmara MA, Abrão AM, Campos-Rubio JC, et al, "Determination of the critical undeformed chip thickness in micromilling by means of the acoustic emission signal". Precis. Eng. Vol.46. p.377–382. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.007
[7] Son SM, Lim HS, Ahn JH. "Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting". Int. J. Mach. Tools Manuf, Vol.45–4–5. p.529–535. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.09.001
[8] Bissacco G, Hansen HN, Slunsky J. "Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling" CIRP Ann. - Manuf. Technol. Vol.57-1, p.113–116. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.085
[9] Lai X, Li H, Li C, et al. "Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness" Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol.48-1. p.1–14. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.011
[10] Afazov SM. Ratchev SM, Segal J. "Determination of cutting forces and process stability in micro-milling of Ti6Al4V alloy by considering the size-effect phenomenon". Micro Nanosyst. Vol.3-3. p.199-209. DOI: https://doi.org/10.2174/1876402911103030199
[11] Wu X, Li L, He N, et al. "Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting" Precis. Eng. Vol45. p.359–364. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.03.012
[12] Lauro CH, Ribeiro-Filho SLM, Brandão LC, et al. "Analysis of behaviour biocompatible titanium alloy (Ti-6Al-7Nb) in the micro-cutting" Meas. J. Int. Meas. Confed. Vol.93. p.529–540. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.059
[13] Pansare VB, Sharma SB. "Chip load sensitive performance in micro-face milling of engineering materials" J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng. Vol.35-3. p.285–291. DOI: https://doi.org/10.1007/s40430-013-0021-2
[14] Baldo D. "Estudo do microfresamento da liga de titânio Ti 6Al 4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica". Director: Brandão L. Dissertação. Universidade Federal de São João del-Rei. São João del-Rei. 2013.
[15] Koç M, Özel T. "Fundamentals of Micro-Manufacturing" En: Koç M, Özel T (ed). Micro-Manufacturing: Design and Manufacturing of Micro-Products. 1st ed. Hoboken NJ: Eds. Wiley. 2011. p.1–23.
[16] Baranov V, Kudryavtsev E, Sarychev G, et al. Acoustic emission in friction. 1st ed. Oxford, UK. Elsevier, 2007. p.232. Tribology. Vol. 53. ISBN: 978-0-08-045150-3
[17] Lee DE, Hwang I, Valente CMO, et al. "Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission". Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol.46. p.176–188. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.04.001
[18] Mian AJ, Driver N, Mativenga PT. "Identification of factors that dominate size effect in micro-machining". Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol. 51-5. p.383–394. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.004
[19] Ferrer C, Salas F, Pascual M, et al. "Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples". Tribol. Int. Vol.43-1–2. p.1–6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.02.009
[20] Marinescu I, Axinte DA, "A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations". Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol.48-10. p.1148–1160. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.01.011
[21] Vogler MP, Kapoor SG, DeVor RE, "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part II: Cutting Force Prediction," J. Manuf. Sci. Eng. Vol.126-4, p.695-705. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1813471.
[22] Li H, Wu B. "Development of a hybrid cutting force model for micromilling of brass". Int. J. Mech. Sci. Vol.115–116. p.586–595. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.08.002
[23] Li K, Zhu K, Mei T. "A generic instantaneous undeformed chip thickness model for the cutting force modeling in micromilling". Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol.105. p.23–31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.03.002
[24] Childs T, Maekawa K, Obikawa T, et al. Methal Machining Theory and Applications. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2000. 408p. ISBN: 0-470-39245-2
[25] Câmara M. "Influência do Efeito Escala Sobre a Operação de Microfresamento" Dirección: Abrão A. Tese. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.
[26] Afazov SM, Ratchev SM, Segal J. "Modelling and simulation of micro-milling cutting forces". J. Mater. Process. Technol. Vol.210-15. p.2154–2162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.033
[27] Lekkala R, Bajpai V. Singh RK, et al. "Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling". Precis. Eng. Vol.35-4. p.625–637. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.04.007
[28] Dokic Z, Lorinson D, Weigel J, et al. "Patellar groove replacement in patellar luxation with severe femoro-patellar osteoarthritis". Vet Comp Orthop Traumatol. Vol.28. p.124–130. DOI: https://doi.org/10.3415/VCOT-14-07-0106
[29] Ucun I, Aslantas K, Bedir F. "The performance Of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of Inconel 718". Precis. Eng. Vol.41, p. 135–144. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.01.002
[30] Yokota T, Sawa T, Yokouchi M, et al. "Frictional properties of diamond-like carbon coated tool in dry intermittent machining of aluminum alloy 5052". Precis. Eng. Vol.38, p. 365–370. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.11.007
[31] Zhao J, Liu Z, Shen Q, et al. "Investigation of cutting temperature during turning Inconel 718 with (Ti, Al)N PVD coated cemented carbide tools". Materials. Vol.11-8, p. 1–17. DOI: https://doi.org/10.3390/ma11081281
[32] Dandekar CR, Shin YC, Barnes J. "Machinability improvement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and hybrid machining". Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol.50-2, p.174–182. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.013
[33] Machado ÁR, Abrão AM, Coelho RT, et al. Teoria da Usinagem dos Materiais, 3rd ed. São Paulo, SP: Blucher, 2015. 407 p. ISBN: 978-85-212-0846-4
[34] Lu X, Jia Z, Wang X, et al. "Three-dimensional dynamic cutting forces prediction model during micro-milling nickel-based superalloy". Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol.81-9–12. p.2067–2086. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-015-7310-0
[35] Bhuiyan MSH, Choudhury IA, Dahari M. et al. "Application of acoustic emission sensor to investigate the frequency of tool wear and plastic deformation in tool condition monitoring". Meas. J. Int. Meas. Confed. Vol.92, p.208–217. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.06.006

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado en parte por la Organización de Estados Americanos (OEA), el Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (GCUB) y la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), código de financiación 001, que son los proveedores de la beca de estudios, y en parte por la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Los autores también agradecen a ATI Specialty Alloys & Components que proporcionó la pieza de tántalo de 99.9 % de pureza.