

FABRICACIÓN DE MICRO-COMPONENTES MEDIANTE ARRANQUE DE VIRUTA. ANÁLISIS DEL ACABADO SUPERFICIAL EN ALEACIONES DE ALUMINIO Y TITANIO

MICRO-COMPONENTS MANUFACTURING BY MACHINING. ANALYSIS OF SURFACE ROUGHNESS IN ALUMINIUM AND TITANIUM ALLOYS

Francisco Mata Cabrera¹, Joao Paulo Davim², Issam Hanafi³

¹Escuela de Ingeniería Minera e Industrial del Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, Almadén, España.

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

³Faculté des Scieces, Université Abdelmalek Es-Saadi, Tetouam, Maroc

RESUMEN

El micro-mecanizado es la tecnología más adecuada para la producción de componentes de muy pequeño tamaño (micro-componentes) en la industria. Se trata de un proceso de fabricación de alta precisión, con aplicaciones en diversos sectores industriales, entre ellos la construcción de máquinas.

El objetivo fundamental de esta investigación es analizar la calidad superficial de los acabados obtenidos en los procesos de micro-mecanizado y valorar su adecuación a las especificaciones exigidas por la industria mecánica (rugosidad, presencia de rebabas, forma y geometría, entre otros.).

Se presenta el estudio experimental de la rugosidad (R_a y R_t) de aleaciones de aluminio y titanio utilizando un proceso específico de micro-torneado. Las medidas de rugosidad efectuadas ponen de manifiesto cómo es posible conseguir calidades superficiales muy buenas, hasta diámetros de probeta de 0.05 mm. Para diámetros inferiores, empeora la calidad superficial y aumentan los defectos de forma (conicidad), debido a la bajísima rigidez de la pieza, lo que la hace muy sensible al discurrir propio del proceso de conformación.

Se proponen modelos de predicción de la rugosidad, con buen grado de aproximación, para ayudar a la caracterización de los procesos de micro-mecanizado.

Palabras clave: Micro-máquinas, micro-torneado, miniaturización, modelos

ABSTRACT

Micro-machining is the most adequate technology for manufacturing of micro-components in the industry. This is a manufacturing precision process with applications in certain industrial field, for example the machining construction.

The objective of this research is to analyze the surface quality in micro-machining processes and to evaluate her possible application in mechanical industry (surface roughness, geometry, aspect, etc.)

This work presents the experimental study of surface roughness (Ra and Rt) using a specific micro-turning process.

The measures of surface roughness reveal how it is possible to obtain superficial very good qualities up to diameters of 0.05 mm. For low diameters, it worsens the superficial quality and the faults of form increase, due to the low inflexibility of the piece.

Prediction models of surface roughness are proposed to the characterization of micro-machining processes.

Key words: Micro-machines, micro-turning, miniaturization, models

INTRODUCCIÓN

El concepto tradicional de máquina, constituida por elementos mecánicos de gran tamaño, con gran consumo de energía (potencia de arrastre), baja precisión y escaso o nulo grado de automatización, ha dado paso a realidades mucho más complejas, tanto en la integración de tecnologías (mecánica, neumática, electrónica, etc.) como en la reducción de tamaños y consumos, y en la posibilidad de realizar operaciones de gran precisión con controles exhaustivos. En este contexto, cabe hablar de las micro-máquinas, pequeñas máquinas para desarrollar operaciones generalmente de precisión, integradas por mecanismos y componentes de muy reducido tamaño. Pensemos, por ejemplo, en la maquinaria de un reloj o en los sistemas de inyección utilizados en automoción. Se requiere, pues, fabricar componentes de dimensiones muy reducidas, esto es, micro-componentes para aplicaciones en las industrias mecánica, biomédica, de automoción o mecatrónica, entre otras.

El desarrollo de nuevos materiales con elevadas prestaciones, su estudio a escala micro y nano tecnológica y el intento continuado en conseguir diseños lo más compactos posible, sustentan la necesidad de avanzar en los procesos de fabricación a esta escala (Chern *et al.*, 2007) La miniaturización de componentes ha pasado a ser una especialidad dentro del diseño y la micro-fabricación, una disciplina también diferenciada, en la que intervienen máquinas, herramientas y equipos de medida que han de ser necesariamente adaptados a las particularidades de este tipo de conformación.

Lo anterior implica una demanda creciente de necesidades de integración de los componentes a nivel micro-escala, fabricados utilizando diferentes materiales; entre otros, los metales y sus aleaciones (Aronson, 2003, Azizur *et al.*, 2005, Hocheng *et al.*, 2012, Groover, 1996) .

La micro-fabricación puede llevarse a efecto utilizando técnicas de conformación tradicionales adaptadas (micro-inyección), mediante arranque de viruta en máquinas herramienta (utilizando herramientas de geometría adecuada) o recurriendo a otro tipo de técnicas de conformación avanzadas (láser, ultrasonidos, conformado foto-químico, difusión térmica, descarga eléctrica, entre otros.) (Groover, 1996).

El meso (< 10 mm) y el micro (< 1 mm) mecanizado son las tecnologías más adecuadas para la producción de componentes de muy pequeño tamaño en la industria (Chern *et al.*, 2007, Aronson, 2003, Azizur *et al.*, 2005, Hocheng *et al.*, 2012, Groover, 1996, Wuele *et al.*, 2001,

Chae *et al.*, 2006) , especialmente cuando se requieren unas exigencias elevadas en cuanto a acabado superficial y a tolerancias dimensionales. Se trata de procesos de fabricación de alta precisión, con aplicaciones en sectores punteros como los siguientes (Chae *et al.*, 2006, Masuzawa, 2000):

- *Industria médica*. Se trata de producir pequeños componentes que puedan ser utilizados como partes de prótesis óseas y dentales (implantes y micro-implantes), o bien, como dispositivos imprescindibles para la realización de operaciones quirúrgicas.
- *Industria electrónica*: equipos de instrumentación y control (sensores, actuadores, etc.), componentes de telefonía, etc.
- *Industria aeroespacial*: elementos de control de flujo, dispositivos de mando, etc.
- *Industria de automoción*: pequeños actuadores, inyectores y boquillas de inyección de combustible, micro-válvulas y otros componentes de reducido tamaño (tornillos, toberas, dosificadores, pasadores, agujas de rodamientos, micro-ejes, micro-ruedas), micro-sensores para la captación de señales de presión, temperatura, proximidad, velocidad angular o aceleración. Paralelamente, la evolución de los automóviles en las últimas décadas hacia la integración de las tecnologías mecánica y electrónica (mecatrónica), demanda componentes de muy reducidas dimensiones para los sistemas de control de estabilidad, inyección electrónica, air bag, etc.
- *Relojería*: micro-mecanismos (ruedas, trinquetes, ejes, levas, etc.)
- *Micro-máquinas*: integradas por micro-sensores, micro-motores, micro-engranajes, micro-actuadores, etc.
- *Modelismo y maquetación*

En elementos y micro-elementos que deben integrar mecanismos, donde existirá contacto y movimiento relativo entre ellos, llega a ser crítico el acabado superficial, además de los ajustes dimensionales precisos. El reducido tamaño de algunos de estos elementos y su peculiar forma, junto con la especificación de un buen acabado superficial que evite desgastes prematuros, requiere optar por procesos de micro-conformación en torno o fresadora, fundamentalmente. Cabe añadir que el mecanizado de micro-piezas no implica necesariamente la utilización de máquinas herramienta de volumen reducido ("micro-tornos" o "micro-fresadoras"); las operaciones de micro-mecanizado pueden desarrollarse en las máquinas CNC convencionales y, por ello, es importante realizar estudios experimentales conducentes a la caracterización de estos procesos (establecimiento de límites de cara a garantizar la integridad y calidad de las piezas mecanizadas, definición de los parámetros funcionales de corte apropiados, estudio de la geometría de las herramientas de corte, determinación de los niveles de calidad superficial alcanzables, entre otros.).

El estudio de las superficies constituye una técnica de caracterización de los materiales muy útil en la práctica. La rugosidad superficial es un parámetro que tiene gran influencia en el comportamiento y la funcionalidad de los componentes mecánicos y en los costes de producción (Abouelatta & Mádl, 2001, Petropoulos *et al.*, 2006), constituyendo una importante variable de control de la calidad. La rugosidad es crítica en los contactos mecánicos, además de otros campos, como la circulación de fluidos o las aplicaciones biomédicas.

La rugosidad superficial que se obtiene durante el proceso del mecanizado es afectada por los parámetros de corte, el desgaste de la herramienta y la dureza del material. Para conseguir la rugosidad deseada es necesario conocer los mecanismos de corte y desprendimiento del material y la cinética de los procesos de mecanizado, que afectan al comportamiento de las herramientas de corte (Sreejith *et al.*, 2000, Mata *et al.*, 2010, Davim *et al.*, 2010).

En la mayoría de las aplicaciones de las micro-piezas mecanizadas se requiere alta calidad en las superficies conformadas, incluyendo exactitud dimensional e integridad superficial. Por

esta razón es necesario llevar a cabo diversas investigaciones, con el objetivo de optimizar los parámetros de corte, para obtener una determinada rugosidad (Abouelatta & Mádl, 2001, Erikssen, 1999) y unas características formales tolerables (cilindricidad).

El micro-mecanizado convencional es un planteamiento flexible que puede utilizar cualquier material que pueda ser mecanizado (Liow, 2009). No obstante, tiene algunas restricciones en la elaboración de componentes (Christenson *et al.*, 1995). Es preciso investigar y desarrollar modelos que permitan optimizar los procesos, mejorar la calidad de los productos y disminuir los costes de producción.

Con el fin de reducir el número de ensayos necesario para realizar una completa caracterización de los procesos de micro-mecanizado, se puede recurrir a técnicas estadísticas de regresión no lineal, al uso de estrategias numéricas basadas en redes neuronales o a otras técnicas similares (Ozel, 2005, Sahin & Motorcu, 2005, Kohli & Dixit, 2005, Jiao *et al.*, 2004, Feng & Wang, 2005), que nos permitirán establecer modelos de predicción y ayudarnos a comprender mejor los mecanismos de corte. A partir de estos modelos puede completarse el programa de experimentación, en aras de conocer las particularidades de los procesos de micro-mecanizado y para definir los modelos físicos de corte correspondientes.

En los últimos tiempos, debido a las exigencias en materia medioambiental, estos procesos se llevan a cabo en ausencia de fluidos de corte (Sulliman *et al.*, 1997). Sin embargo, la supresión total de los fluidos origina condiciones muy agresivas de los procesos (Kelly & Cotterell, 2002, Nouari *et al.*, 2003, Carrilero *et al.*, 2002). Cada aleación que pretendamos mecanizar posee sus propias características, lo que marcará los límites operativos del proceso.

A pesar de que son conocidos los procesos de mecanizado convencional de los metales y sus aleaciones, no es posible hacer una extrapolación directa y anticipar cuál será el comportamiento ante operaciones de arranque de viruta sobre piezas muy pequeñas. En estos casos, la geometría de la herramienta y la propia estabilidad de la pieza (relación esbeltez/rigidez) son, a priori, variables que podrán condicionar sustancialmente los resultados y distanciar quizá las pautas respecto del patrón de mecanizado convencional sobre piezas "grandes".

El objetivo fundamental de esta investigación es analizar la calidad superficial de los acabados obtenidos en estos procesos de micro-mecanizado y valorar su adecuación a las especificaciones exigidas en micro-componentes de diferentes dispositivos y máquinas (rugosidad, presencia de rebabas, forma y geometría, entre otros).

Se plantean en este estudio modelos no lineales que pueden ayudar en la caracterización de los procesos de micro-mecanizado, en función del diámetro requerido para una determinada aplicación, así como la calidad superficial necesaria.

MATERIALES

Se han ensayado dos tipos de aleaciones metálicas, de base aluminio y titanio.

El aluminio (Al) posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad (2.700 kg/m^3) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Las aleaciones de aluminio constituyen una alternativa viable en la mejora de la flexibilidad y la competitividad. La tendencia actual es su paulatina incorporación en la definición de ciclos industriales que incorporan máquinas de alta velocidad, CNC de última generación y aleaciones de aluminio específicas. Las características intrínsecas de las

aleaciones de aluminio favorecen el mecanizado a alta velocidad, con velocidades de avance y corte muy superiores a las alcanzadas con aleaciones férricas.

El titanio (Ti) tiene alta resistencia a la corrosión y gran resistencia mecánica, pero es mucho más oneroso que el acero, lo cual limita su uso industrial. Determinadas aleaciones de titanio unen a las características del material base su fácil maquinabilidad, lo que las hace muy interesantes para aplicaciones que requieran de procesos de conformación mediante arranque de viruta.

Las aleaciones de titanio se pueden tornearear con poca dificultad. Dentro de lo posible se deben usar herramientas de carburo metálico para el torneado, ya que ofrecen una mayor productividad y una vida útil más prolongada. Como el acero inoxidable, la baja conductividad térmica del titanio inhibe la disipación de calor dentro de la misma pieza de trabajo, necesitando la aplicación adecuada de refrigerantes en el proceso de mecanizado convencional.

Este tipo de aleaciones tiene aplicaciones en prótesis dentales, micro válvulas, actuadores, inyectores de motores, mecanismos de precisión y, en general, componentes de micro-máquinas.

EXPERIMENTACIÓN

El proceso de micro-torneado se ha llevado adelante en un torno CNC Eclipse, de potencia 1.5



(a)



(b)

Kw y 4.000 rpm de velocidad máxima de rotación del cabezal (Figura 1).

Figura 1. Torno Eclipse utilizado en los ensayos de micro-torneado:
(a) Equipo (b) Ejemplo del programa de cilindrado

Para medir la rugosidad (rugosidad media: R_a y rugosidad máxima: R_t), dado el diámetro tan reducido de las probetas mecanizadas, se ha utilizado un rugosímetro Talysurf CLI (Figura 2), que permite realizar una exploración topográfica, utilizando un palpador inductivo de contacto o un medidor láser sin contacto. Para la observación de la cilindricidad-conicidad se ha utilizado un microscopio óptico convencional (Figura 2).

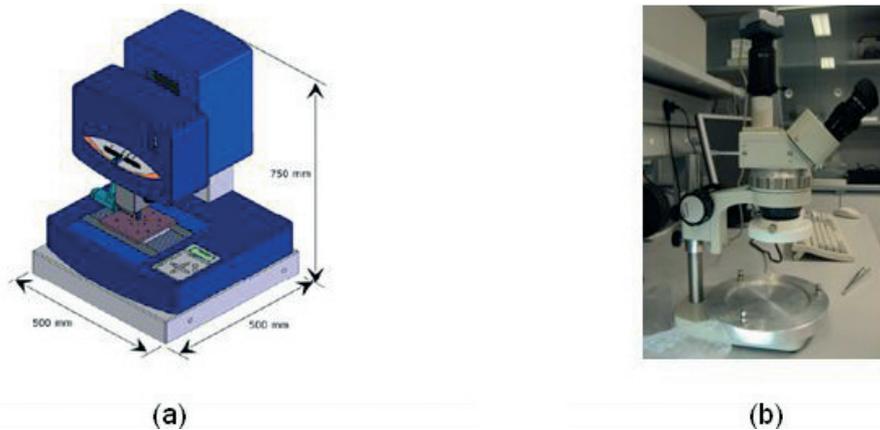


Figura 2. Equipos de medida: (a) Rugosímetro Talysurf CLI (b) Microscopio óptico

En cuanto a las herramientas de corte, se ha utilizado porta SDJCR2020K-07 y plaquita de acabado, conforme se expone en la figura 3.

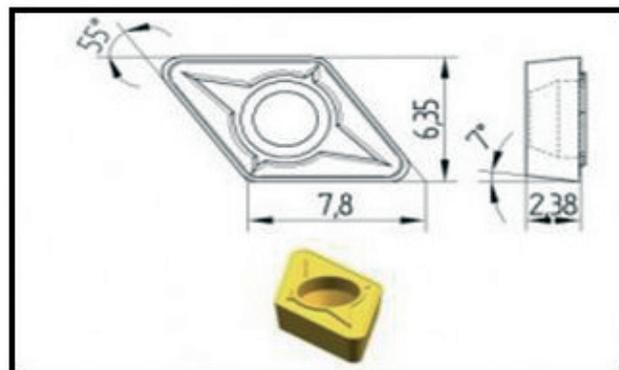


Figura 3. Geometría de la herramienta de corte

Las condiciones de corte utilizadas fueron las siguientes: velocidad de corte: 500 rpm, avance: 0.002 mm/rev y profundidad de pasada: 0.001 mm.

El diámetro de las probetas ensayadas osciló entre 0.5 y 0.025 mm, con longitudes comprendidas entre 10 mm y 5 mm, con el fin de guardar un valor mínimo de la relación L/D (longitud/diámetro).

En la figura 4 se observan algunos detalles de los ensayos de torneado, y se puede apreciar el tamaño relativo de las piezas mecanizadas.

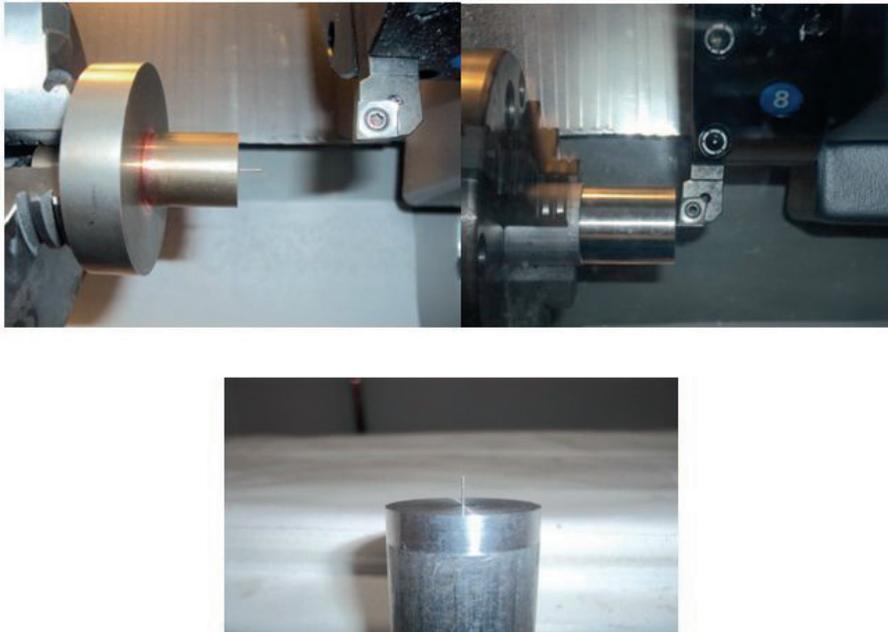


Figura 4. Detalles de la experimentación. Probetas mecanizadas (0.2 mm de diámetro, en la imagen inferior)

En aplicaciones que producen ajustes precisos en el proceso de montaje de componentes, es fundamental poder conseguir unos diámetros exactos, de acuerdo con las especificaciones técnicas fijadas en el correspondiente proyecto. Para ello es preciso utilizar técnicas de caracterización de la calidad de las piezas; entre ellas, el estudio de la rugosidad, la determinación del grado o porcentaje de conicidad-cilindricidad y la precisión dimensional.

Modelos matemáticos de predicción

En cuanto al tratamiento de los resultados, cabe la posibilidad de establecer modelos matemáticos de predicción que pueden ser muy útiles para caracterizar los procesos, al tiempo que servir de guía práctica para el desarrollo de los mismos, fijando determinadas condiciones de corte, materiales, herramientas, etc.

Al medir la bondad de la estimación y de la capacidad de predicción, se tendrán en cuenta:

- *La Suma de Cuadrados de los Errores (SSE)*, que representa la suma de cuadrados de las desviaciones de los valores de los residuos respecto a su media muestral.
- *Coficiente de determinación múltiple, R^2 , y R^2 ajustado*, que representa medidas habituales en el análisis de regresión, denotando el porcentaje de varianza justificado por las variables independientes. El R^2 ajustado tiene en cuenta el tamaño del conjunto de datos, y su valor es ligeramente inferior al de su correspondiente R^2 .

Finalmente, el proceso de validación se realizó comparando los valores observados y los estimados mediante los distintos métodos, a través del *error cuadrático medio (RMSE)*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los datos experimentales

Una vez realizados los ensayos de micro-torneado, se procedió a medir la rugosidad y a estudiar la cilindridad de las piezas mecanizadas.

La tabla 1 muestra los resultados experimentales de los parámetros de rugosidad Ra y Rt para los dos materiales, en función del diámetro de la pieza.

Tabla 1. Valores experimentales de rugosidad

Diámetro (mm)	Aleación de ALUMINIO		Aleación de TITANIO	
	Ra (μm)	Rt (μm)	Ra (μm)	Rt (μm)
0.4	1.45	26.14	1.40	14.82
0.2	1.30	22.31	1.34	8.89
0.1	1.38	25.23	1.43	6.31
0.05	1.49	22.03	1.37	6.99
0.025	5.53	46.17	4.76	49.62

Se puede apreciar de manera especialmente significativa en la rugosidad media (Ra), que la rugosidad se mantiene en valores bajos y prácticamente constantes a medida que se reduce el diámetro de la pieza, hasta los 0.2 mm. Para valores inferiores se aprecia un aumento de la rugosidad, en especial para valores de 0.05 mm e inferiores. Este aumento se debe a la baja rigidez de las piezas, y a la sensibilidad a las vibraciones.

En el caso de la aleación de titanio, las tendencias puestas de manifiesto son similares a las observadas en el caso anterior. Cabe destacar que los valores de Rt son inferiores en la mayoría de los casos, en comparación con los obtenidos en la aleación de aluminio. Dado que el parámetro de rugosidad máxima tiene un significado físico (comparado con la media estadística Ra), queda en evidencia la mejor maquinabilidad de la aleación de titanio, en términos de acabado. Sin embargo, la conclusión precedente requerirá analizar otros criterios como las fuerzas de corte o el desgaste de la herramienta.

La figura 5 muestra un ejemplo de perfil de rugosidad obtenido.

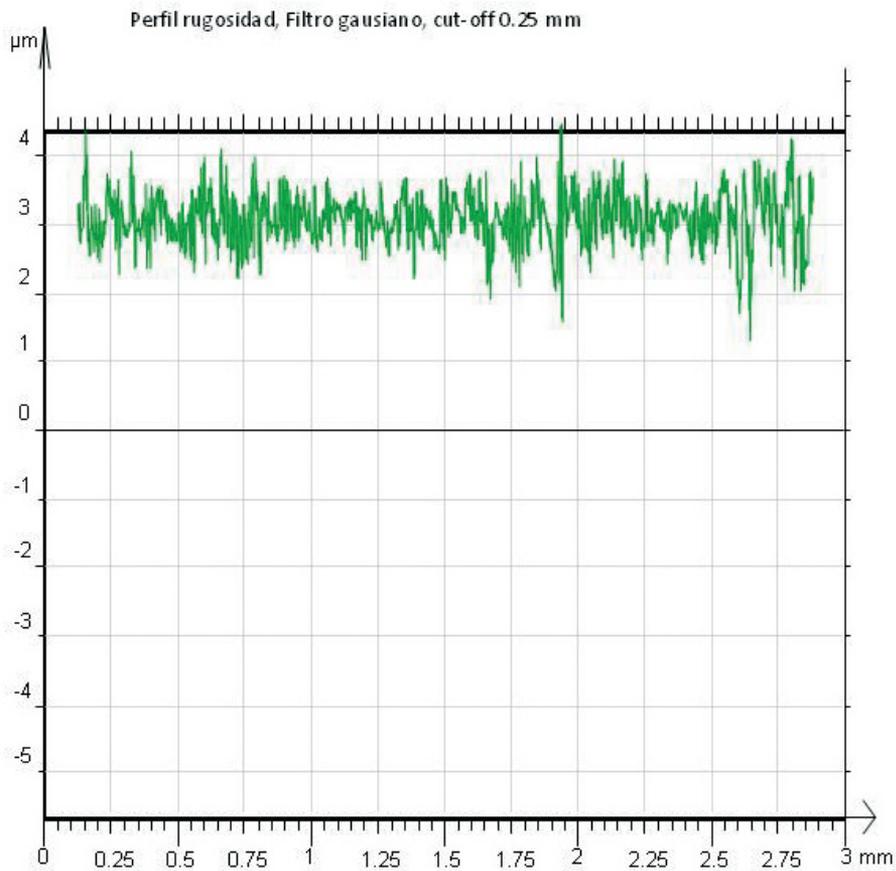


Figura 5. Ejemplo de perfil de rugosidad obtenido (probeta de aleación de titanio)

El aspecto de la superficie y las marcas de mecanizado se pueden observar en la figura 6.

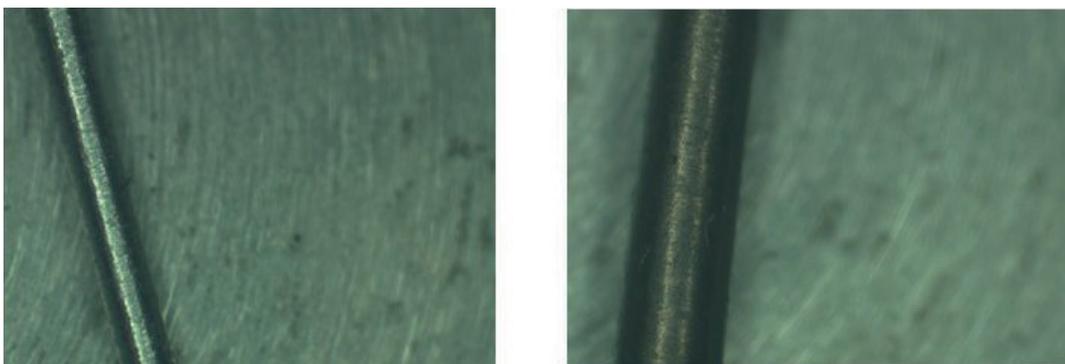


Figura 6. a) Probeta de aleación de aluminio (450 aumentos), diámetro: 0.2 mm;
b) Probeta de aleación de titanio (450 aumentos), diámetro: 0.4 mm

Referido a la conservación de las características formales de las piezas, se ha calculado la conicidad (%) con la ayuda de imágenes aumentadas. La conicidad, en función de la longitud y del diámetro, se calcula mediante la ecuación (1). Los resultados se presentan en la tabla 2.

$$c[\%] = 100 \frac{D}{L} \quad (\text{Ec. 1})$$

Tabla 2. Evolución de la conicidad en función del diámetro de la probeta

Diámetro (mm)	Aleación de ALUMINIO	Aleación de TITANIO
	Conicidad (%)	Conicidad (%)
0.4	6.25	3.63
0.2	6.66	3.98
0.1	6.94	4.26
0.05	7.26	4.81
0.025	8.42	5.78

Se observa en la tabla que los valores de conicidad son en general bajos, aunque pueden no llegar a ser asumibles en ciertas aplicaciones. La conicidad o “defecto de cilindridad” aumenta al reducir el diámetro de la pieza, debido fundamentalmente al aumento de la sensibilidad de la pieza al discurrir propio del proceso de mecanizado. Es decir, a medida que disminuye el diámetro, para una misma longitud, la probeta se vuelve menos rígida y aumenta el riesgo de cabeceos o vibraciones, lo que influye negativamente en la forma final de la misma. Se aprecia también cómo los valores de conicidad son siempre inferiores en el caso de la aleación de titanio, lo cual se debe a su mayor rigidez y a su mayor facilidad para el micro-mecanizado. En este caso, la interacción de la herramienta de corte con la micro-pieza es más “fluida”, generándose valores más bajos de las fuerzas de corte, lo que permite alcanzar un mayor grado de garantía de la integridad de la micro-pieza.

La figura 7 muestra el detalle del tratamiento gráfico realizado para medir la conicidad.

Es importante utilizar una relación adecuada “longitud a diámetro” para reducir la conicidad, las vibraciones y mejorar la calidad superficial de las piezas mecanizadas.



Figura 7. Obtención de la conicidad (probeta de aleación de aluminio)

Modelos de predicción

A continuación se presentan los modelos matemáticos no lineales desarrollados para la predicción de los parámetros de la rugosidad Ra y Rt.

Aleación de ALUMINIO

$$Ra = 2,188 \cdot 10^{-8} d^{-5,167} + 1,377 \quad (2)$$

$$Rt = 6,398 \cdot 10^{10} e^{-868,9 d} + 22,4 e^{0,3462 d} \quad (3)$$

Aleación de TITANIO

$$Ra = 1,879 \cdot 10^{-15} d^{-9,522} + 1,387 \quad (4)$$

$$Rt = 1538 e^{-141,9 d} + 4,988 e^{2,732 d} \quad (5)$$

En la tabla 3 se reflejan las medidas de la bondad de la estimación y de la capacidad de predicción, mediante los parámetros SSE, RMSE, R² y R² ajustado.

Tabla 3. Validación de los modelos no lineales propuestos

Modelos	SSE	R ²	R ² ajustado	RMSE
(2)	0.011	0.99	0.99	0.075
(3)	7.82	0.98	0.92	2.79
(4)	0.004	0.99	0.99	0.045
(5)	0.144	0.99	0.99	0.380

Como se puede observar, en base a los valores de los parámetros seleccionados las estimaciones realizadas son, en general, muy buenas (nótese, por ejemplo, que todos los valores de R² están por encima de 0.98).

La figura 8 muestra los valores experimentales de la rugosidad de las superficies micro-mecanizadas (Ra y Rt), junto con la representación de los modelos de predicción en función del diámetro de la pieza, para el caso de la aleación de aluminio.

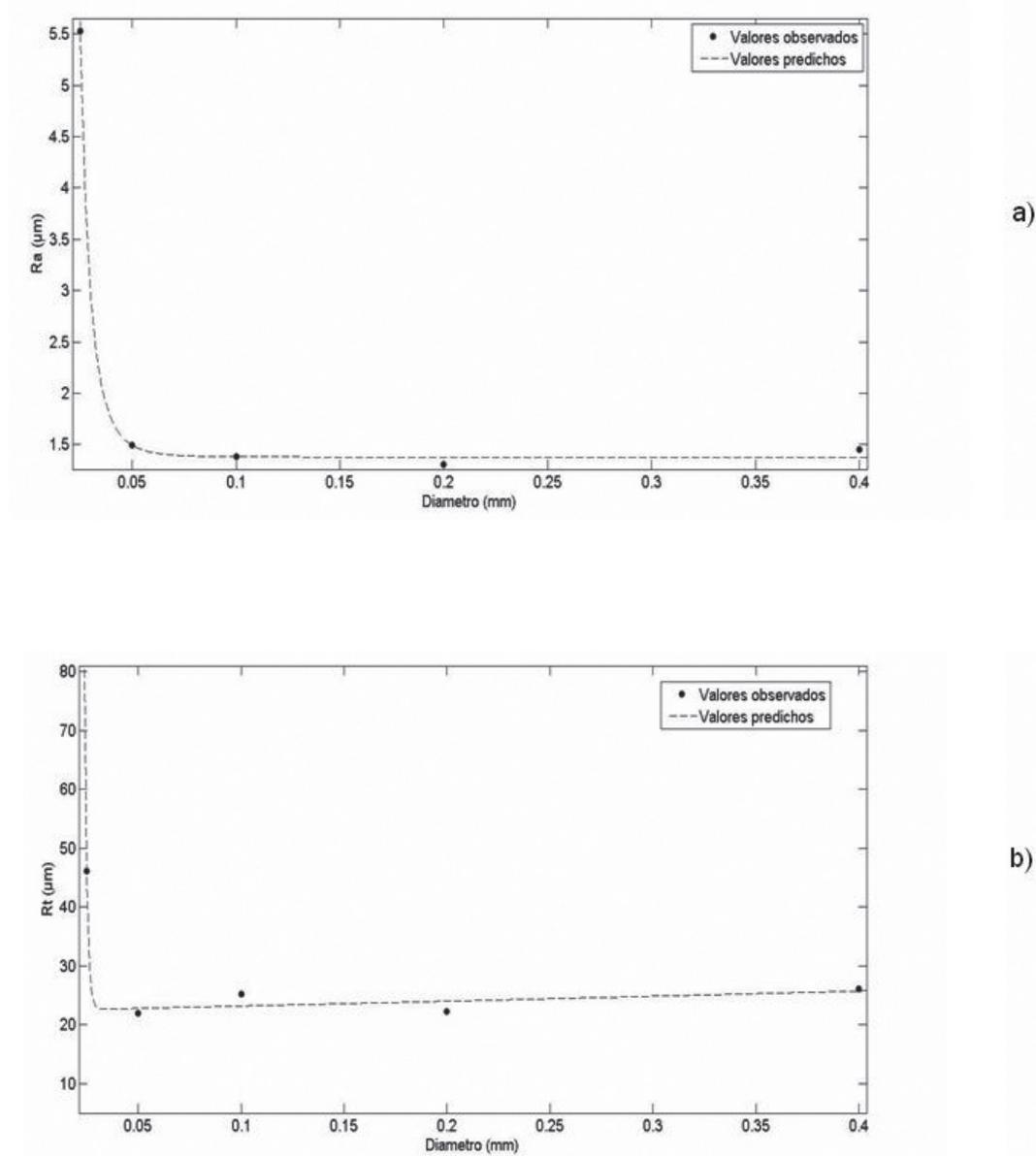
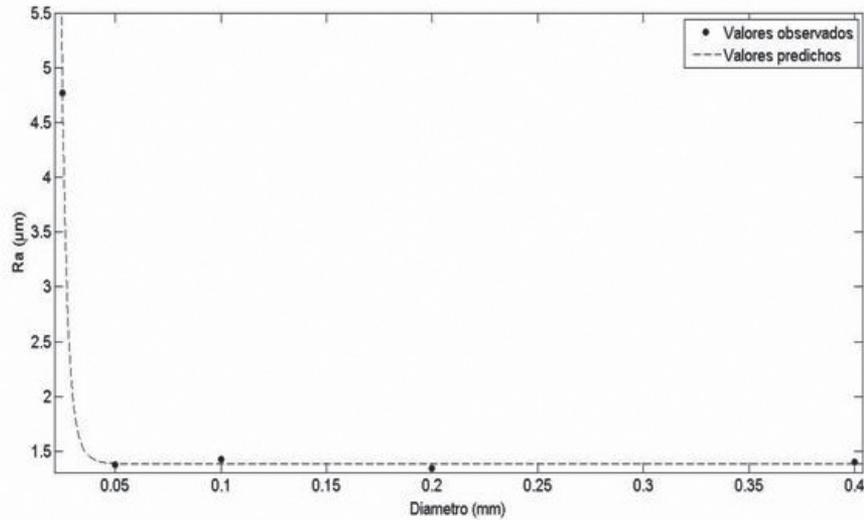
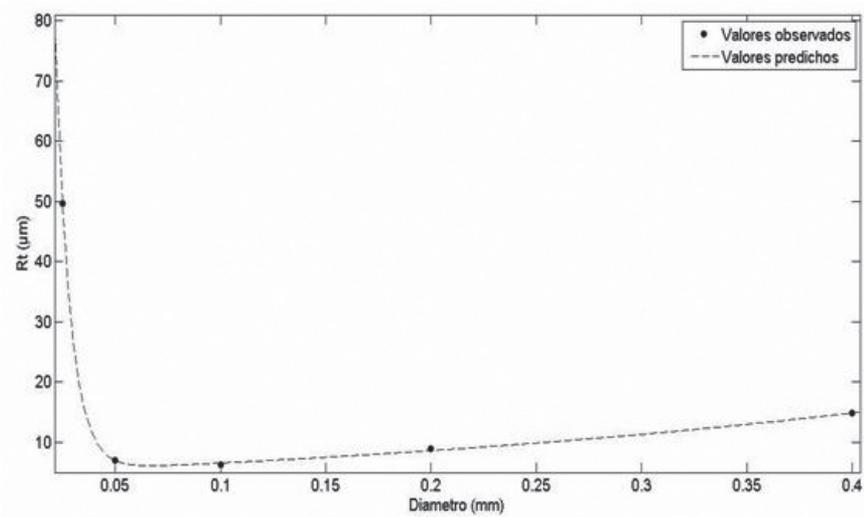


Figura 8. Valores experimentales y predichos de la rugosidad en función del diámetro de la probeta: a) Ra, b) Rt

La figura 9 muestra los valores experimentales de la rugosidad de las superficies micro-mecanizadas (Ra y Rt), junto con la representación de los modelos de predicción en función del diámetro de la pieza, para el caso de la aleación de titanio.



a)



b)

Figura 9. Valores experimentales y predichos de la rugosidad en función del diámetro de la probeta: a) Ra, b) Rt

En todos los casos se observa cómo los modelos propuestos ajustan con gran aproximación el rango de valores experimentales.

CONCLUSIONES

El estudio de la rugosidad de las superficies mecanizadas constituye el mejor indicador de la calidad del producto y proporciona información relevante sobre su potencial de aplicación en diferentes sectores.

Este trabajo forma parte de una investigación sobre el micro-mecanizado de estos materiales en torno, con el objetivo de evaluar los diámetros de micro-pieza con los que es posible trabajar utilizando herramientas de acabado convencionales. Ciertamente, es de esperar un mejor comportamiento cuando se empleen herramientas específicas para micro-torneado.

No obstante, se obtienen en general valores de rugosidad bajos, lo que permite responder a las especificaciones de un número importante de aplicaciones prácticas, donde la precisión dimensional es fundamental. Entre estas aplicaciones se encuentran los componentes y micro-componentes utilizados en la construcción de micro-máquinas (micro-ejes, agujas de rodamientos, etc.) y, en general, pequeñas piezas de instrumentación, sistemas de inyección, etc.

Los resultados obtenidos permiten concluir que es posible conformar, mediante arranque de viruta, piezas de revolución de muy reducido tamaño (0.05 mm de diámetro) con estas aleaciones, garantizando calidades superficiales muy buenas, acordes con las especificaciones típicas de estas aplicaciones.

Es importante hacer notar que el avance utilizado es muy bajo, lo que sin duda alguna ha contribuido a obtener valores pequeños de rugosidad. La utilización de avances bajos y profundidades de corte bajas, permite trabajar con fuerzas de corte que implica valores muy pequeños, con el propósito de garantizar la integridad de las piezas mecanizadas (existe evidente riesgo de deformación plástica o incluso fractura en caso contrario).

Por otra parte, los modelos propuestos presentan unos ajustes muy buenos, tal y como lo corroboran los indicadores de bondad.

REFERENCIAS

Abouelatta, O.B., Mádl, J. (2001). Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations, *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 269-277.

Aronson, R.B. (2003). *The new world of micromanufacturing*, Manufacturing Engineering pp81-92.

Azizur, M., Rahman, M., Senthil Kumar, A., Lim, H.S. (2005). CNC microturning: an application to miniaturization, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (6), 631-639.

Carrilero, M.S., Bienvenido, R., Sánchez-Sola, J.M., Alvarez, M., Gonzalez, A., Sahin, Y., Motorcu, A.R. (2005). Surface roughness model for machining mild steel with carbide tool, *Materials and Design* 26(4), 321-326.

Chae, J., Park, S.S., Freiheit, T. (2006). Investigations of micro-cutting operations, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, 46(3-4), 313-332.

Chern, G.L., Wu, E., Cheng, J., Jao, J. (2007). Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM, *Precision Engineering*, 31(1), 122-129.

Christenson, T., Guckelh, R. (1995). In: Markuks, W. (Ed.), *Micromachining and Microfabrication Process Technology*. Austin, Texas, United States of America, 134-145.

Davim, J.P., Mata, F., Gaitonde, V.N., Karnik, S.R. (2010). Machinability evaluation in unreinforced and reinforced PEEK composites using response surface models, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 23 (1) , 5-18.

Eriksen, E. (1999). Influence from production parameters on the surface roughness of a machined short fibre reinforced thermoplastic, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39 (10), 1661-1618.

Feng, C.X., Wang, X. (2002). Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 20 (5), 348–356.

Groover, M.P. (1996). *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Process and Systems*, Prentice Hall International Editions.

Hocheng, H., Chang, J.H., Jadhav, U. (2012). Micromachining of various metals by using *Acidithiobacillus ferrooxidans* 13820 culture supernatant experiments, *Journal of Cleaner Production*, 20 (1), 180-185.

Jiao, Y., Lei, S.T., Pei, Z.J. (2004). Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: surface roughness prediction for turning operations, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44 (15) 1643–1651.

Kelly, J.F., Cotterell, M.G. (2002). Minimal lubrication machining of aluminium alloys, *J. Mat. Proc. Tech.*, 120(1-3), 327-334.

Kohli, A., Dixit, U.S. (2005). A neural-network based methodology for the prediction of surface roughness in a turning process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25 (1–2), 118–129.

Liow, J. (2009). Mechanical micromachining: a sustainable micro-device manufacturing approach, *Journal of Cleaner Production*, 17, 662-667.

Marcos, M. (2002). A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al-Cu Alloy, *Int. J. Mach. Tool Man.*, 42, 215-220.

Masuzawa, T. (2000). State of the art of micromachining, *Annals of the CIRP*, 49, (2) 473-488.

Mata, F., Petropoulos, G., Ntziantzias, I., Davim, J.P. (2010). A surface roughness analysis in turning of Polyamide PA-6 using statistical techniques *International Journal of Materials and Product Technology*, 37 (1-2) , 173-187.

Nouari, M., List, G., Girot, F., Coupard, D. (2003). Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys, *Wear* 255(7-12), 1359-1368.

Ozel, T. (2005). Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (4-5), 467-479.

Petropoulos, G., Davim, J.P., . Mata, F., Pandazaras, C. (2006). New considerations of evaluating the anisotropy of machined surfaces, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 12 (1), 1-6.

Sreejith, P.S., Krishnamurthy, R., Malhota, S.K., Narayanasamy, K. (2000). Evaluation of PCD tool performance during machining of carbon/phenolic ablative composites *Journal of Materials Processing Technology*, 104,53-58.

Sulliman, S.M.A., Abukari, M.I., Mirghani, E.F. (1997). Microbial contamination of cutting fluids and associated hazards, *Tribology International*, 30(10), 753-757.

Wuele, H., Hüntrup, H., Tritscher, H. (2001). Micro-cutting of steel to meet new requirements of miniaturization, *Annals of the CIRP*, 50 (1), 61-64.