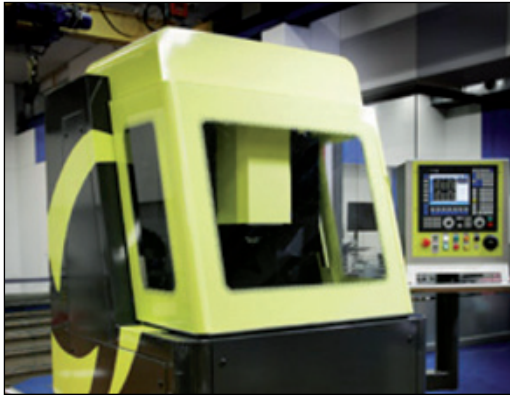


Diseño y validación de una máquina con mínimo rozamiento para operaciones de microfresado



Peio Olaskoaga-Arrate
Aratz Olaizola-Olazarigirre
Harkaitz Urreta-Prieto

Ingeniero Técnico Industrial
Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial

IK4-Ideko. Línea de Investigación de Diseño Mecánico. Arriaga, 2 - 20870 Elgoibar.
Tfno: +34 943 748000. polaskoaga@ideko.es

Recibido: 14/05/2012 • Aceptado: 08/10/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5060>

DESIGN AND VALIDATION OF A FRICTIONLESS MACHINE FOR MICROMILLING OPERATIONS

ABSTRACT

- The increase of the precision and the finishing quality along with the downsizing of the parts and their details demand developing specific machines and tools prepared to fulfill these requirements. IK4-Ideko in conjunction with Soralue and other Spanish partners has designed and manufactured micromilling and ultra short pulse laser ablation machines. In this article, the main characteristics of the developed ultraprecision micromilling machine are explained, being two of them exclusive and innovative. The first one is that both the main structure and the moving slides are made of natural granite. The second one is that the X axis slide, the table where the parts are clamped, is designed in such a way that there is no contact between the stationary and moving elements. All the active elements and protection systems are in the base. The final result is a machine with very agile dynamics compared to other machines of its characteristics. Besides the description of the characteristics of the machine, the verification tests and the parts that are machined with tools with a diameter less than 0.1mm are described in this paper.
- **Keywords:** micromilling machine, micromilling, granite, aerostatic guidance, frictionless, linear motor, micromanufacturing, micro nozzle, micro needle.

RESUMEN

El incremento de la precisión y la calidad de los acabados junto con la reducción del tamaño de las piezas y sus detalles exigen desarrollar máquinas y herramientas específicas con tecnologías adecuadas a esas necesidades. IK4-Ideko ha diseñado y fabricado en colaboración con Soralue y otras empresas españolas, máquinas para procesos de microfresado y de ablación láser. En este artículo se describen las características más destacadas de la fresadora de ultraprecisión desarrollada, siendo dos de ellas exclusivas y novedosas. La primera es que tanto su estructura fija como los carros móviles han sido fabricados en granito natural. La segunda que su eje X, la mesa donde se montan las piezas, está diseñado de tal forma que no existe contacto alguno entre la parte móvil y la fija, habiendo colocado todos los elementos activos en la base y contando con protecciones fijas. El resultado final es una máquina de elevada dinámica en comparación con otras máquinas de sus características. Además de la descripción de las características de la máquina, en el artículo se detallan las verificaciones realizadas y las características de las piezas que mecaniza trabajando con brocas y fresas de diámetro inferior a 0,1mm.

Palabras clave: microfresadora, microfresado, granito, guiado aerostático, mínimo rozamiento, motor lineal, microfabricación, microboquilla, microaguja.

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la máquina herramienta europeo atraviesa momentos de dificultad. La producción y el consumo se han volcado a unos pocos países del este. La explosión de China en estos últimos años, también como productor, se ha sumado a la tradicional posición de privilegio de la pujante industria japonesa, convirtiendo al máximo mercado consumidor, China, en coto casi cerrado a los fabricantes europeos a excepción de Alemania. En esta coyuntura, el micromecanizado se presenta como un sector atractivo, por sus expectativas de crecimiento y por la reducida oferta de equipamiento con características industriales, con un grupo muy reducido de fabricantes exclusivos de máquinas de micromecanizado. Dentro de ese grupo se encuentran por ejemplo KERN [2] y KUGLER [3]. Diversificar la actividad hacia el sector de micromecanizado alberga la posibilidad de fabricar piezas de gran valor añadido y así poder hacer frente a la complicada situación económica que está atravesando el sector [4]. La tendencia hacia la miniaturización de elementos tradicionales por razones medioambientales o de comodidad para las personas, unido a nuevas necesidades de sectores como el médico, en el que se innova constantemente en técnicas más amigables para la dispensación de medicamentos o la cirugía no invasiva, han provocado muchas expectativas que ahora empiezan a cumplirse [5].

Debido a esta oportunidad presentada en el sector, algunos de los principales fabricantes de centros de mecanizado así como empresas específica y exclusivamente orientadas a este tipo de aplicaciones han desarrollado máquinas microfresadoras para poder conseguir un buen posicionamiento en el nuevo sector emergente del micromecanizado. Como claro ejemplo se encuentran MAKINO [6], FANUC [7] y YASDA [8]. Entre estos fabricantes se pueden diferenciar claramente dos corrientes. A un lado se encuentran los fabricantes de centros de mecanizado tradicionales que han optado por desarrollar una microfresadora utilizando sus tecnologías habituales, tales como guías de rodadura o accionamientos mediante husillo a bolas, en un diseño compacto y robusto, con cursos de ejes pequeños, materiales adecuados y un excelente ajuste de montaje y puesta en marcha [9].

Al otro lado se encuentran aquellos fabricantes que, tomando como base a las máquinas de medición por coordenadas, han adoptado la tecnología de dichas máquinas dotándolas de rigidez suficiente y protecciones necesarias. Por ello, es frecuente encontrar máquinas que han adoptado el granito como material estructural y la tecnología aerostática para el guiado [10].

IK4-Ideko ha desarrollado una microfresadora (Fig. 1) seleccionando las tecnologías que le permitan un máximo nivel de repetibilidad y resolución, dotando a los ejes de una elevada dinámica y buscando un óptimo comportamiento de la máquina ante cambios de temperatura ambiente y reduciendo el impacto de las fuentes internas de calor con el objetivo de fabricar piezas de tamaño y detalles pequeños, con una configuración de máquina industrial.



Fig. 1: Vista general de la microfresadora

En la fabricación de piezas de gran nivel de precisión hay tres propiedades del equipamiento empleado que resultan críticas para conseguir una buena calidad del trabajo: la estabilidad térmica, la repetibilidad y la capacidad de los ejes para realizar desplazamientos mínimos y avances muy lentos. Esta máquina responde a esas demandas con la fabricación de los elementos estructurales en granito natural, guiados aerostáticos, motores lineales y reglas de gran resolución. El dimensionamiento de los motores y su integración han sido realizadas para conseguir una elevada dinámica que permita conservar los avances en las interpolaciones con pequeño radio de curvatura o en desplazamientos cortos sin que eso provoque el calentamiento de las zonas próximas a los motores. El resultado es una máquina con una elevada dinámica, con valores elevados tanto de aceleración como de sobreaceleración o *jerk* (vector que define la derivada de la aceleración respecto al tiempo), combinada con una gran precisión de posicionado.

2. DISEÑO DE LA MÁQUINA

La microfresadora desarrollada por IK4-Ideko es una máquina de precisión de propósito general de tres ejes, pero por su diseño y dimensiones es capaz de albergar dos ejes más para convertirse en una máquina de cinco ejes. Está orientada a la fabricación de piezas de gran valor añadido tales como micromoldes, superficies con microestructuras funcionales o elementos ópticos. El volumen de trabajo de la máquina en la configuración de tres ejes permite fabricar piezas de tamaño medio con un nivel de precisión elevado.

El eje X es la mesa móvil donde se amarra la pieza, y sobre el pórtico se encuentran los ejes Y y Z con dos carros cruzados. El carro vertical es el eje Z y el transversal es el eje Y. La estructura está íntegramente realizada en granito, lo que proporciona a la máquina un excelente comportamiento térmico debido a la gran inercia térmica del granito y su coeficiente de dilatación térmica [11]. El

guiado de todos los ejes es aerostático, sin rozamiento, y se compone de cojinetes enfrentados para compensar la falta de amortiguamiento del aire con el aumento de rigidez [12]. El accionamiento se realiza mediante motores lineales sin atracción permanente, lo que evita el efecto de rizado de fuerza o *cogging*. En cada uno de los ejes X y Z se montan dos, colocados simétricamente a ambos lados del centro de gravedad de la masa móvil de cada uno de los ejes, mientras que el eje Y dispone de un único motor. El cierre de los lazos se realiza mediante la señal de reglas ópticas con una resolución de 12nm. El cabezal principal va montado en posición vertical, con una potencia máxima de 1,1kW a 120.000r/min, rodamientos cerámicos, refrigeración interna y amarre directo de la herramienta con una pinza ER 8-UP.

Número de ejes	3 (+2)
Sistemas de guiado (X-Y-Z)	Cojinetes aerostáticos
Actuación (X-Y-Z)	Motores lineales libres de rizado de fuerza (<i>cogging</i>) (2-1-2)
Feed-back (X-Y-Z)	Captadores ópticos y reglas expuestas (resol. 12nm) (2-1-1)
Curso (X-Y-Z)	240x400x200 (mm)
Velocidad de avance (X-Y-Z)	130m/min; 120m/min; 100m/min
Aceleración (X-Y-Z)	2,5g; 2g; 1,4g
Cabezal de fresar	1,1kW a 120.000 r/min

Tabla 1: Características del prototipo

El conjunto se sustenta sobre apoyos neumáticos para realizar un aislamiento pasivo de las perturbaciones externas. A su vez, estos apoyos se encuentran sobre una estructura soldada de acero para dejar el prototipo a una altura de trabajo adecuada. Se puede observar la disposición de las distintas partes de la máquina en la Fig. 2.



Fig.2: Vista general en 3D de la microfresadora

Las características más destacables del diseño de la máquina son su estructura, partes fijas y móviles, íntegramente realizada en granito natural, y el diseño del eje X, que consigue eliminar cualquier unión física entre la parte fija y la móvil.

El granito natural goza de unas propiedades que lo hacen muy propicio para su empleo en sistemas de precisión. Se trata de un material natural con una gran estabilidad geométrica, tanto porque no sufre procesos de estabilización lenta como porque, ante estímulos térmicos, dispone de una muy baja difusividad y un bajo coeficiente de dilatación. Concretamente, su coeficiente de dilatación lineal (α) es de $6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$, la mitad del correspondiente al hierro fundido y el acero, y una cuarta parte si lo comparamos con el del aluminio. El impacto económico del uso de uno u otros materiales es dependiente del diseño en mayor medida que del precio en bruto de los mismos. Por ello es muy importante diseñar para fabricar en un determinado material, y no pretender trasladar el diseño a la fabricación en cualquier material.

El diseño del eje X sin contacto entre la parte móvil y la fija se ha realizado con el objetivo de conseguir una precisión dinámica óptima y un mínimo incremento constatable de desplazamiento. Estas dos características son necesarias para ejecutar avances muy lentos sin que haya grandes variaciones en la velocidad real del carro. Se han colocado dos motores y dos reglas de captación de forma simétrica de forma que la resultante de su empuje, la captación y el centro de gravedad del carro coinciden en el mismo punto, con lo que se eliminan vuelcos en los tres ejes. Todos los elementos activos de este eje se encuentran en la base, de tal forma que el elemento móvil, la mesa de la máquina, se encuentra en una perfecta levitación, sin ningún contacto con la base. Para ello se han colocado los cojinetes, las cabezas lectoras de las reglas y los bobinados de los motores en la base, y además, se ha realizado la protección de las guías mediante elementos fijos. El accionamiento de los ejes y la ausencia de contacto con la base permiten conseguir grandes aceleraciones y una excelente dinámica, así como una transmisión muy reducida de perturbaciones que perjudiquen la precisión de posicionado. Se puede observar la configuración del eje en la (Fig. 3).

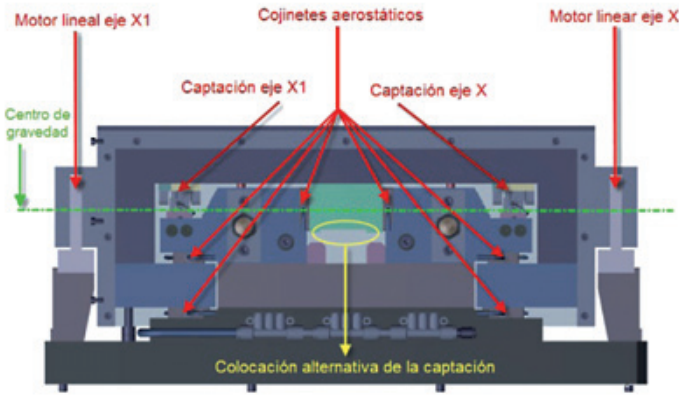


Fig.3: Disposición de los elementos en el eje X.

Se pueden ensayar diferentes estrategias de control, puesto que equipa dos reglas de captación y dos motores cada uno con su regulador, y además puede montar una sola regla en posición central.

Los ejes Y y Z también están guiados aerostáticamente aunque las geometrías son totalmente distintas, así como la disposición de las reglas de captación y motores lineales. Por razones constructivas, en estos dos ejes no se ha podido conseguir la ausencia total de rozamiento alcanzada en el eje X, puesto que era inevitable la conducción de cables y tubos de aire y refrigerante hasta el eje Z donde va montado el cabezal. En cualquier caso, esa conducción de mangueras y la protección de los ejes se han realizado siempre con el objetivo de reducir el rozamiento al mínimo posible.

Los cojinetes aerostáticos con los que se han configurado los guiados han sido pegados en su posición para no incorporar mayor flexibilidad con los elementos de sujeción. Para conseguir las estrechas tolerancias del montaje se han empleado las propias guías como superficie de referencia, y mediante el vacío se ha conseguido copiar esas superficies mientras se inyectaba el adhesivo epoxy (Fig. 4) [13].



Fig. 4: Proceso de pegado utilizando vacío

3. RESULTADOS

Siguiendo la norma VDI 3441 [14] se han realizado ensayos para determinar la precisión de posicionamiento y la repetibilidad de posicionamiento de los tres ejes del prototipo previa a cualquier tipo de calibración. Los resultados obtenidos se pueden encontrar en la Tabla II.

Eje	Curso (mm)	P.Precisión de posicionamiento (μm)	Ps.Repetibilidad de posicionamiento (μm)
X	200	1,829	1,575
Y	350	2,29	1,197
Z	180	4,884	4,618

Tabla II: Precisión y repetibilidad de posicionamiento de los ejes

Se observa claramente que el eje Z es el que peores precisión y repetibilidad presenta. La causa es la variación de temperatura en el cabezal (T_{cab}), sea por el efecto ambiental o por el efecto de los ciclos de refrigeración del propio cabezal. Se han realizado ensayos para determinar los

desplazamientos inducidos en la punta de la herramienta y se ha visto que la punta de la herramienta se desplaza $2,85\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ en dirección Z cualquiera que sea la excitación térmica: la variación de la temperatura ambiental en el exterior (T_{AE}) e interior (T_{AM}) de la máquina (Fig.5), el efecto de los ciclos del refrigeración (temperatura del refrigerante a la entrada del refrigerador (T_{ent}) y a la salida (T_{sal}) (Fig. 6) o el giro del cabezal (Fig. 7). Es un resultado muy correcto si se analizan otras referencias de deformaciones térmicas de máquinas de medición por coordenadas donde Kruth presenta una deformación térmica del eje Z sin ningún tipo de compensación de $11,67\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ [15].

De los resultados de los ensayos se deduce que en una máquina de micromecanizado, aun introduciendo materiales térmicamente más estables que los tradicionales hierro fundido o acero, un foco térmico inducido por un elemento de la máquina como el cabezal repercute directamente sobre su precisión.

El giro del cabezal es un foco importante de calor y se refleja en los desplazamientos medidos en el mandrino colocado en el cabezal. El mayor efecto se detecta en la dirección del propio eje del cabezal donde se ve claramente el efecto del refrigerador, confirmando una vez más que mejorar o compensar el comportamiento térmico del cabezal aumentará la precisión de la máquina. La variación de temperatura es del orden de 2°C al poner en marcha el cabezal y luego se estabiliza en oscilaciones de $0,5^{\circ}\text{C}$ durante las 3 horas de duración del ensayo (Fig. 7). Se verifica que el comportamiento del eje es muy sensible a las variaciones térmicas que puedan aparecer.

Se han realizado asimismo pruebas para determinar el mínimo incremento realizable, midiendo con sensores capacitivos externos el desplazamiento real del eje X al programarle incrementos submicrométricos. En la Figura 8 se presenta la señal de los sensores capacitivos durante el ensayo: el tiempo en el eje de abscisas, y el desplazamiento del carro X, en el de ordenadas. Se ha conseguido verificar incrementos consistentes y repetitivos de $0,25\mu\text{m}$ en el eje X. Esto demuestra el buen comportamiento del eje, debido a que no presenta ningún rozamiento, ni en las guías ni en los elementos periféricos como los portacables, conducciones neumáticas o fuelles de protección.

También se ha medido con un sensor capacitivo la repetición de la posición del carro X a lo largo del tiempo realizando ciclos de vaivén. Se trata de hacer trabajar al eje en continuo, y medir la estabilidad de la posición en un punto del curso. Esta medición se realiza cada cierto tiempo, tiempo durante el que el eje se desplaza según un determinado ciclo.

Se ha visto que el comportamiento del eje es excelente teniendo una variación del mismo punto de medición de $0,3\mu\text{m}$ a lo largo de las 2 horas que dura el ensayo (Fig. 9). Se observa en la gráficas de temperaturas medidas durante el ensayo que la variación en todos los puntos de medida es pequeña. La máquina está instalada en una sala acondicionada, y su carenado amortigua las oscilaciones de la temperatura ambiente (T_{AE}) resultando que la temperatura

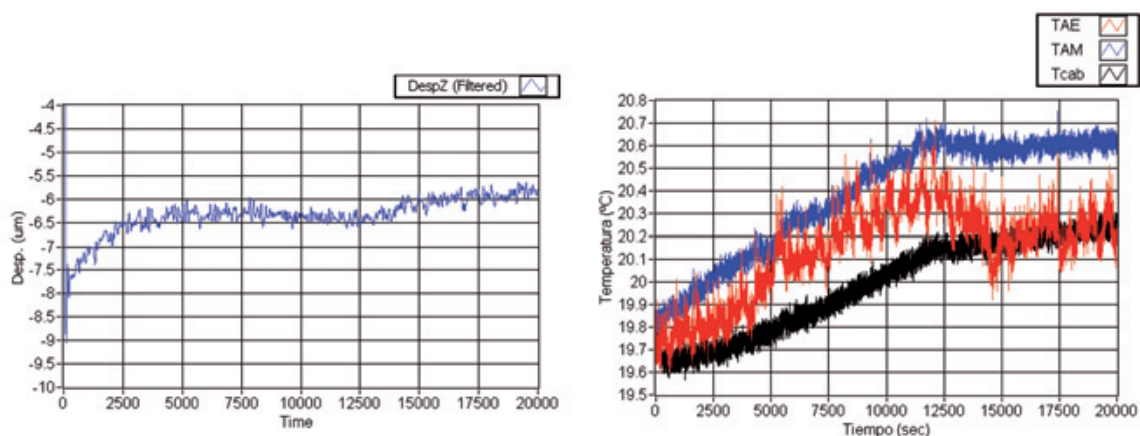


Fig. 5: Desplazamiento inducido por la variación de la temperatura ambiente (izquierda) y temperaturas adquiridas (derecha)

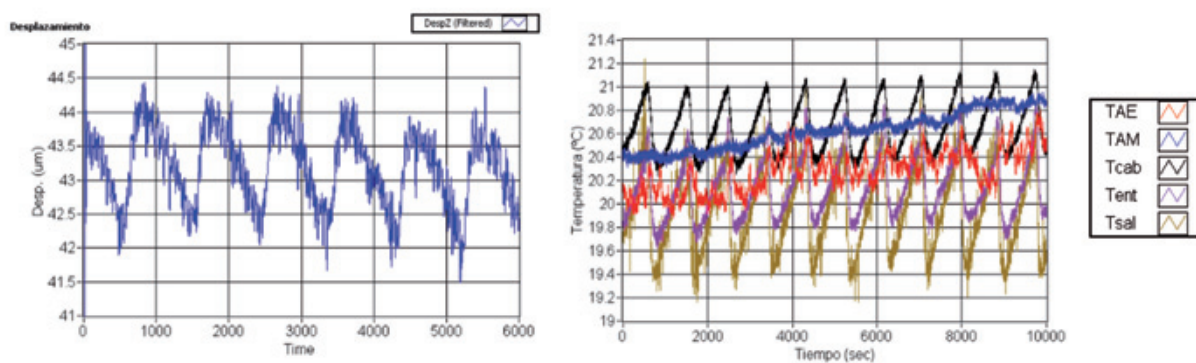


Fig. 6: Desplazamiento inducido por el calentamiento del cabezal debido a los ciclos de refrigeración (izquierda) y temperaturas adquiridas (derecha)

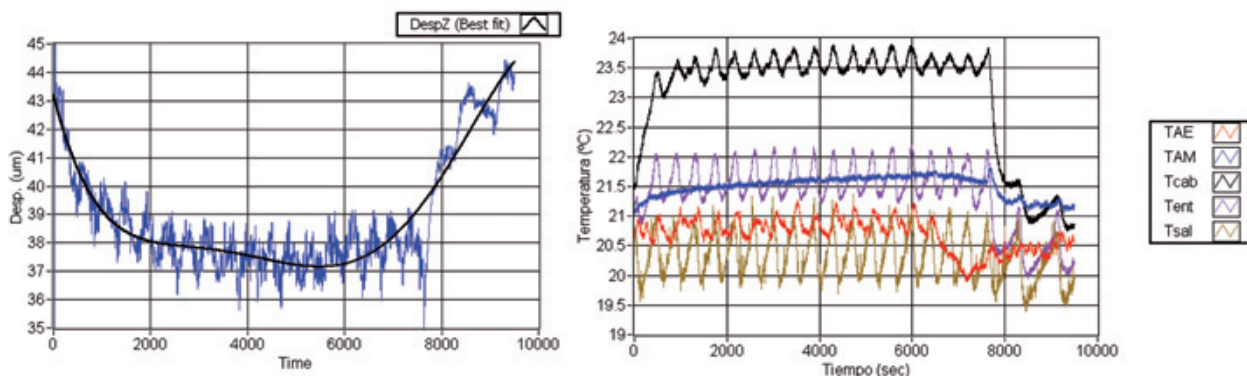


Fig. 7: Dilatación térmica del eje Z debido al giro del cabezal (izquierda) y temperaturas adquiridas (derecha)

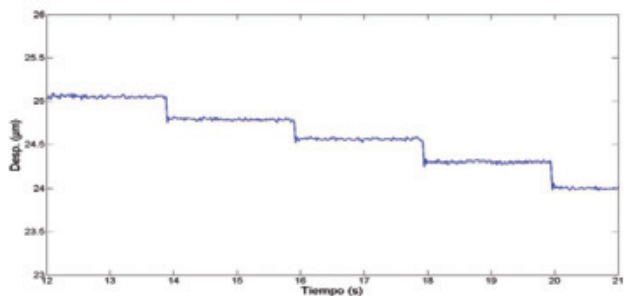


Fig. 8: Realización de incrementos de 0,25μm

en el interior de la zona de trabajo (*TAM*) varíe de forma más suavizada y siga la tendencia de las mediciones de temperatura de los motores lineales del eje (*Tmot*). Estos motores no cuentan con sistema de refrigeración, pero han sido seleccionados e integrados precisamente para tener un mínimo impacto térmico sobre la máquina.

Para finalizar la validación del prototipo y comprobar las cualidades de la máquina se han realizado ensayos de mecanizado. Se han buscado piezas de procesado relativamente largo que obliguen a mantener una adecuada

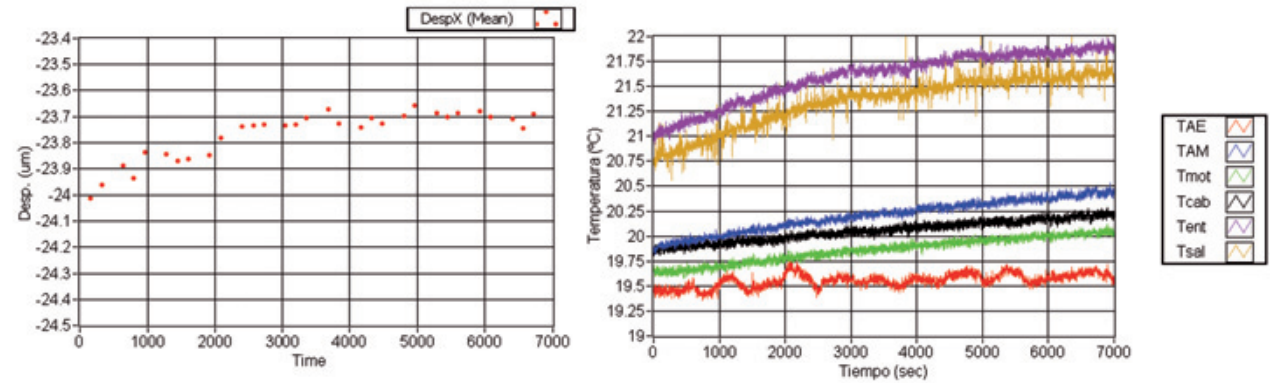


Fig. 9: Variación de la posición del eje X (izquierda) y temperatura (derecha) durante la prueba de vaivén

estabilidad térmica. Además, en ciertas operaciones también se exige a la máquina una agilidad en los desplazamientos, de tal forma que se puedan poner en valor algunas de las características que se han querido alcanzar con este prototipo. Se trata de piezas con operaciones comunes en el ámbito de la microfabricación, especialmente en el sector médico. Básicamente las operaciones que se han realizado en las piezas han sido el fresado y el taladrado.

En este artículo se van a presentar dos piezas que se han fabricado en el prototipo: microboquillas para pintura de precisión y unas agujas de muy alta relación de aspecto.

3.1. MICROBOQUILLAS

Las microboquillas para el pintado de alta precisión consisten en un cono con un agujero pasante de diámetro de 0,1mm en su cúspide. Se realiza el mecanizado sobre latón, mecanizando una matriz de trece boquillas en un bloque. Para la fabricación de las microboquillas se han utilizado fresas con diámetros que van desde 2mm hasta 0,1mm. Los detalles geométricos de las microboquillas se pueden observar en la Fig. 10.

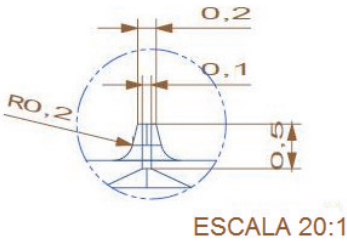


Fig. 10: Detalle de las características geométricas de las microboquillas

La fabricación de dichas microboquillas se realiza con lubricación con vaporización de aceite (MQL) y comienza con el mecanizado de una cajera y varios taladrados en la superficie inferior del bloque. En la superficie superior se realiza un desbaste y acabado del fondo, el acabado de las paredes de las boquillas y, para finalizar, se taladra el orificio de las microboquillas. Se puede observar el detalle de la microboquilla en la Fig. 11. Las condiciones de mecanizado de las trece boquillas realizadas sobre el bloque de latón se pueden observar en la Tabla III.

Parte	Operación	Ø hta. (mm)	S (min ⁻¹)	F (mm/min)	ap(mm)	ae(mm)	t (min)	Leyenda Ø hta. = Diámetro de la herramienta S = Velocidad de giro del cabezal F = Avance ap = Profundidad de pasada ae = Inmersión radial t = Tiempo de ciclo
Cajera inferior	Desbaste y acabado	2	30000	600	0,5	0,2	10,37	
	Taladrado	1	100000	30	0,3	-	10,75	
Superficie superior	Desbaste	0,6	58000	1000	0,03	0,1	13,73	
	Acabado suelo	0,5	70000	810	0,02	0,025	5,07	
	Acabado	0,4	88000	800	0,003	-	12,78	
	Taladrado	0,1	100000	15	0,03	-	11,83	
Tiempo total (min)							64,53	

Tabla III: Condiciones de mecanizado de las microboquillas

El resultado final se puede observar en la Fig. 11 tomada en el microscopio electrónico de barrido o SEM. La captura se realizó con una escala de 100µm, una tensión de trabajo (EHT) de 23,71kV, a una distancia de trabajo (WD) de 32,5mm y adquiriendo la señal de los electrones secundarios (Signal A=SE1).

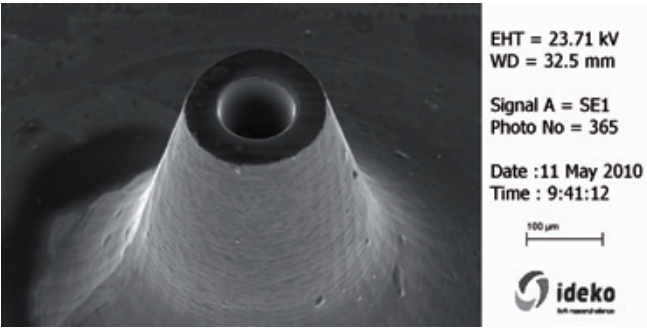


Fig. 11: Detalle de una microboquilla en el SEM.

3.2. AGUJAS DE GRAN ESBELTEZ

En el sector biomédico y de salud se observa una tendencia hacia la miniaturización como resultado de las nuevas técnicas de cirugía no invasiva y la manipulación celular. Uno de los ejemplos es el de la aguja para tomar muestras o suministrar fármacos, son los llamados *microneedles*. Esta prueba sirve para verificar la capacidad del prototipo de fabricar piezas de gran esbeltez, con una relación de aspecto de 70 en este caso. El diámetro exterior de la aguja es de 0,1mm mientras que la altura de la aguja es de 7mm. Para ello se ha utilizado una fresa de 2mm de diámetro. En la Fig. 12 se muestran las principales dimensiones de la matriz de agujas de gran esbeltez mecanizadas.

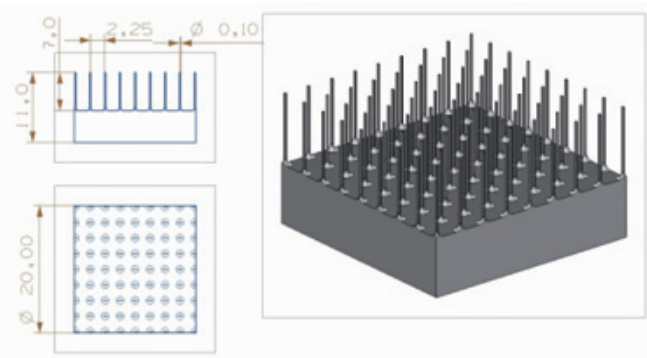


Fig. 12: Detalle de las características geométricas de las agujas de gran esbeltez.

Los parámetros de corte que se observan en la Tabla IV corresponden al mecanizado de una única aguja partiendo de un tocho enterizo.

El material usado es el ORVAR SUPREME 45 HRC. El resultado se puede observar en la Fig.13 donde se presenta la captura realizada en el microscopio SEM a una escala de 100µm, con una tensión de trabajo de 20kV (EHT) a una distancia de trabajo (WD) de 25,5mm y adquiriendo la señal de los electrones secundarios (Signal A=SE1).

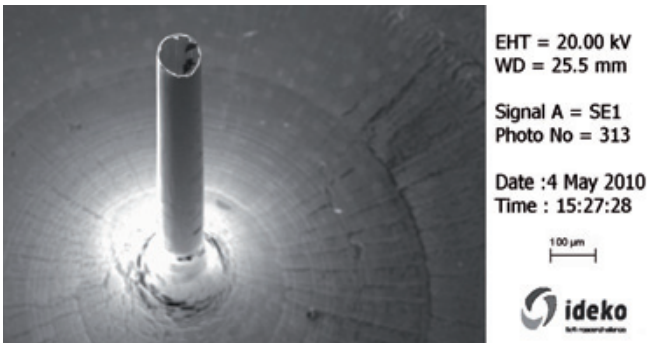


Fig. 13: Detalle de la microaguja en el SEM

Es en este tipo de piezas donde se requiere una dinámica elevada para efectuar cambios de trayectoria a grandes avances con interpolaciones de ejes realizando radios de curvatura muy pequeños. Se trata de procesos en los que los ejes están constantemente sometidos a altas aceleraciones y valores de *jerk*, lo que puede provocar el calentamiento de los accionamientos y la excitación de los modos de la estructura.

4. CONCLUSIONES

La apuesta realizada por IK4-Ideko durante estos últimos años por la microfabricación se ve reflejada en el desarrollo de este y otros prototipos. El desarrollo de una máquina con mínimo rozamiento en sus guiados permite conseguir realizar incrementos de desplazamientos de 250nm de forma repetitiva y constante y alcanzar grandes dinámicas que permitan la fabricación de piezas que contengan operaciones de superacabado con un requerimiento de avances y aceleraciones alto. El uso de materiales tales como granito o elementos de máquina no tan habituales como los motores lineales o reglas de gran resolución puede llevar a una subida en el coste final de la máquina, pero si se busca

Parte	Operación	Ø hta. (mm)	S (min ⁻¹)	F (mm/min)	ap(mm)	ae(mm)	t (min)
Aguja completa	Desbaste	2	20000	1300	0,050	2	5,02
	Acabado	2	35000	600	0,020	-	3,78
	Tiempo total (min)						8,80

Tabla IV: Condiciones de mecanizado de las agujas de gran esbeltez

un comportamiento superior, hay que emplear tecnologías menos convencionales.

Queda patente que estrategias que mejoren el comportamiento térmico del cabezal y establezcan cualquier desplazamiento inducido por efectos térmicos mejorarán de forma sustancial cualquier error de posicionamiento. Por un lado, se deben parametrizar los ciclos de refrigeración de forma que no tengan oscilaciones excesivas. Por otro lado, se deben utilizar técnicas de compensación en los casos como el del cabezal, donde las compensaciones a aplicar suelen ser sencillas y muy efectivas. Se observa que la relación entre el calentamiento del cabezal y la dilatación axial de la punta de la herramienta es proporcional en todos los casos analizados, por lo que la aplicación de una sencilla regla de compensación es evidente.

5. AGRADECIMIENTOS

IK4-Ideko agradece al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España la financiación parcial de los trabajos que han conducido a la obtención de estos resultados a través de su Programa de Proyectos Singulares Estratégicos, así como a las entidades participantes en el Proyecto "Micromanufacturing".

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ruiyuan Tiger. *Machine Tool After Crisis*. [en línea]. June 2011. EzineArticles.com. Disponible en Web: <<http://ezinearticles.com/?Machine-Tool-After-Crisis&id=6363994>> [Consulta: 26 de abril de 2012].
- [2] KERN Micro- und Feinwerktechnik GmbH & Co. KG. *Catálogo de productos* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.kern-microtechnik.com/page.php?page_id=5&tid=2> [Consulta: 26 de abril de 2012].
- [3] KUGLER GmbH. *Catálogo de productos* [en línea]. Disponible en Web: <<http://www.kugler-precision.com/standard-machines.html>> [Consulta: 26 de abril de 2012].
- [4] CECIMO study on the competitiveness of the European machine tool industry. CECIMO. Diciembre, 2011 [ref. 26 de abril 2012]. Disponible en Web: <<http://www.cecimo.eu/communications/news/161-cecimocompstudy.html>>
- [5] Masuzawa T. "State of the Art of Micromachining", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2000, Vol. 49, Issue 2, p. 473-488, ISSN: 0007-8506. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63451-9.
- [6] MAKINO. *Catálogo de productos* [en línea]. Disponible en Web: <<http://www.makino.com/industries/micromachining/>> [Consulta: 27 de abril 2012]
- [7] FANUC CORPORATION. *Catálogo de productos* [en línea]. Disponible en Web: <<http://www.fanuc.co.jp/en/product/robonano/index.htm>> [Consulta: 27 de abril de 2012]
- [8] YASDA MACHINES. *Catálogo de productos* [en línea]. Disponible en Web: <<http://www.yasda.com/machines.aspx>> [Consulta: 27 de abril de 2012]
- [9] Huo D, Cheng K, Wardle F. "Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine—UltraMill. Part 1: holistic design approach, design considerations and specifications". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. April 2010, Vol. 47, Issue: 9, p. 867-877, ISSN: 0268-3768, DOI: 10.1007/s00170-009-2128-2
- [10] Khanfir H, Bonis M, Revel P. "Improving flatness in ultraprecision machining by attenuating spindle motion errors". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, Issue: 7-8, 2005, p. 841-848.
- [11] MicroplanGroup. *General catalogue nº8* [en línea]. Disponible en Web: <http://www.microplan-group.com/mpg/Download/Catalogues/EN/2012/EN_2012_we.pdf> [Consulta: 4 de mayo de 2012].
- [12] Slocum A, Basaran M, Cortesi R, et al. "Linear Motion Carriage with Aerostatic Bearings Preloaded by Inclined Iron Core Linear Electric Motor". *PrecisionEngineering*. Vol. 27, Issue 4, October 2003, p. 382-394. ISSN: 0141-6359. DOI: 10.1016/S0141-6359(03)00037-0
- [13] Olaskoaga P, Hurreta H, Olaizola A et al. "Diseño y fabricación de una microfresadora para aplicaciones de ultraprecisión". En: *18 Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación* (10-12 de noviembre de 2012, Donostia – San Sebastián)
- [14] VDI-Verlag GmbH. *Statistical Testing of the Operational and Positional Accuracy of Machine Tools; Basis*. VDI/DGQ 3441. ICS: 25.080.01. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1977.
- [15] Kruth J – P, Vanherck P, Van den Bergh C et al. "A parametric model for compensation of the temperature dependent geometry of a coordinate measuring machine". En: *II International Seminar on Improving Machine Tool Performance*. (La Baule, France, 3-5 July, 2000)