

Apoyo de gran amortiguamiento basado en fluidos magnetoreológicos para la eliminación de vibraciones en la industria aeroespacial

E. Díaz-Tena⁽¹⁾, L. N. López de Lacalle Marcaide⁽¹⁾, F. J. Campa Gómez⁽¹⁾, D. L. Chaires Bocanegra⁽²⁾

*(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco UPV-EHU
estibaliz_diaz@ehu.es*

(2) Dpto. de Ingeniería. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

El mecanizado de alta velocidad de estructuras de baja rigidez es un proceso ampliamente utilizado en la industria aeroespacial. Durante el mecanizado de este tipo de piezas, llamados componentes monolíticos, se eliminan altas cantidades de material utilizando parámetros de corte agresivos (hasta 40000 rpm y 0.05 mm/diente) con el riesgo de llegar a generar un proceso inestable. Para dejar la curvatura entre suelo y pared se deben utilizar herramientas de geometría compleja (como las esféricas o tóricas), lo cual inestabiliza el proceso aún más por presentar ángulo de filo variable. Incluso para evitar colisiones entre porta-herramienta o cabezal contra la pieza, las herramientas suelen ser colocadas con gran voladizo, lo que posiblemente conlleva tener baja rigidez a flexión. El chatter afecta negativamente a la productividad y calidad de los componentes y es por ello por lo que se debe controlar.

En el siguiente artículo se llevará a cabo un análisis de la estabilidad en fresado para suelos delgados con mecanizado mediante herramientas tóricas. Para ello, se realizarán unas primeras pruebas para detectar a partir de qué espesor se da la aparición de chatter. Además se analizará la variación de los parámetros modales para luego poder realizar el análisis de estabilidad en el fresado mediante el diagrama de lóbulos en 3D. Se propondrá una solución basada en fluidos magnetoreológicos para la supresión de la inestabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Muchas de las empresas de hoy en día basan sus procesos de fabricación en operaciones de mecanizado para fabricar una amplia variedad de componentes. Para estas empresas es de vital importancia que sus procesos de producción sean eficientes y que los productos desarrollados cumplan las expectativas de acabado, precisión, calidad y dimensiones que el cliente requiere. Otro de los aspectos importantes a tener en cuenta es el nivel de producción: las empresas apuestan cada vez más por procesos más óptimos, con menor tiempo muerto y menor tiempo tanto de mantenimiento como de cambio de herramienta.

La optimización indudablemente está ligada a un aumento de los parámetros de corte, velocidad de corte y avance por diente entre otros. Este incremento puede generar inestabilidades durante el proceso de corte, las cuales en caso de no ser controladas o eliminadas repercuten negativamente en la calidad de los productos. Ejemplo de ello es el chatter, un fenómeno de vibración autoexcitada. Generalmente, este problema dinámico busca ser controlado seleccionando los parámetros de corte mediante diagramas de estabilidad; sin embargo, la mayoría de los modelos ignoran efectos físicos tales como el desgaste, la fricción, la temperatura y el comportamiento no-lineal del material y esto hace que no pueda evitarse del todo este fenómeno, deteriorando la calidad de la pieza.

2. ESTADO DEL ARTE

A través del tiempo, se han desarrollado varias alternativas de solución para la supresión de chatter en mecanizado. Ejemplo de ello son: uso de actuadores para compensar la

deformación y vibración de la pieza de trabajo [1], incrementar el espesor inicial de la pieza [2], variación de la velocidad de husillo hacia velocidades más estables [3], empleo de Materiales Inteligentes [4-7].

2.1. Uso de Materiales Inteligentes para la supresión de chatter

Entre los Materiales Inteligentes empleados en sistemas de mecanizado se encuentran los materiales electroreológicos (ER) y magnetoreológicos (MR), fluidos cuyo comportamiento reológico puede ser controlado externamente a través de un campo eléctrico o magnético respectivamente. El uso consiste en aplicar un campo, teniendo como resultado un cambio en la viscosidad y por lo tanto, un cambio en el esfuerzo de fluencia de los fluidos.

Las ventajas de utilizar estos fluidos en procesos de mecanizado resultan ser: poder trabajar a un amplio rango de frecuencias, respuesta en tiempo reducido, facilidad de ser intercambiables, adaptabilidad a los procesos y ser reversibles.

Son varios los estudios basados en el uso de estos materiales. Segalman y Redmond [4] utilizaron fluidos ER para supresión de chatter en barras de mandrinar. La rigidez y amortiguamiento de una barra de mandrinar fue variada a través de la aplicación de un campo eléctrico a una manga rellena de fluido ER para la supresión de chatter en 1999 [5]. Mei *et al* [6] eliminó el chatter en una barra de mandrinar mediante fluidos MR, pudiendo ajustar la rigidez y propiedades de la barra mediante el control del campo magnético. Finalmente, en 2010, Çeşmesi y Engin desarrollaron un amortiguador basado en fluido MR, modelándolo teóricamente para poder predecir el comportamiento del amortiguador controlable mediante el campo magnético y fue testeado en una máquina convencional de impacto [7].

2.2. Supresión de chatter en suelos delgados

Dada la complejidad del estudio de suelos delgados, hasta ahora no se han realizado muchas investigaciones en torno a este tema. Smith y Dvorak [8] desarrollaron estrategias de mecanizado de alta velocidad para suelos delgados, proponiendo que fuera la misma pieza la que de el soporte necesario durante el mecanizado, es decir, utilizando herramientas de fresa frontal dejaban sobre-material en las esquinas de la pieza de tal manera que al mecanizar el suelo y la pared se evitaba la presencia de chatter. Luego con una herramienta de punta esférica daban la terminación deseada, dejando el radio necesario entre pared y suelo. En cuanto a la supresión de la inestabilidad fue exitoso, pero la necesidad de realizar un cambio de herramienta aumentaba el tiempo de proceso.

En 2006 Fleischer [9] propuso rigidizar la pieza mediante el uso de dispositivos de sujeción y otros medios entre los que se encuentran los imanes permanentes, los actuadores piezo-eléctricos y los fluidos reológicos. Se conseguía suprimir el chatter, pero el coste del diseño y fabricación de los dispositivos era considerable.

La dinámica variable de suelos delgados suponiendo la vibración en la dirección del eje de la herramienta fue estudiada por Campa [10]. Mecanizando con una herramienta tórica obtuvo el diagrama de lóbulos de estabilidad en 3D en el cual podía definir velocidades estables en función de la posición de la herramienta en la pieza, con lo que mejoró la calidad superficial de la pieza variando la velocidad del husillo. También estudió la influencia de parámetros de corte sobre el chatter, concluyendo que la cantidad de material a remover puede significar la aparición de vibraciones en la pieza.

3. METODOLOGÍA. PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS

Para realizar las pruebas se utilizó el Centro de Mecanizado de Alta Velocidad Kondia HS1000, el cual puede alcanzar una velocidad de giro de hasta 24.000 rpm.

La pieza de trabajo fue de material Aluminio 7075T6, de gran uso en la industria aeronáutica y automotriz. De este material se prepararon probetas circulares de 200mm de diámetro y 10mm de espesor, como se puede ver en la figura 1, de las que se mecanizó un

diámetro de 150mm. El dispositivo de sujeción de la pieza se diseñó para permitir la vibración libre de la placa en una dirección.



Figura 1. Izq.) Probeta lista para ser colocada en el dispositivo de sujeción. Dcha.) Montaje de dispositivo y probeta en el centro de mecanizado

Debido a que en el mecanizado de componentes monolíticos es necesario dejar un radio entre pared y suelo de entre 2.5 y 6mm es necesario el uso de una herramienta de geometría que contenga un radio de acuerdo. Por ello, en este estudio se empleó una herramienta de metal duro tórica, de diámetro 16mm, 2 filos y un radio de acuerdo 2.5mm.

Se comenzó por definir primero el espesor inicial de la pieza que generara vibración autoexcitada al ser mecanizada, para luego dar paso al análisis de estabilidad.

Cuando una estructura monolítica es mecanizada, sus características dinámicas cambian respecto al tiempo debido a varias razones: arranque de material, el cual produce reducción de masa y rigidez de pieza [11] y variación de parámetros modales en el área de corte [12]. La metodología aquí empleada para la obtención de los diagramas de lóbulos es la propuesta por [13], que consiste en discretizar la trayectoria de la herramienta con el objetivo de observar y considerar la variación de parámetros modales en la pieza según la posición de la misma.

Para la obtención de la variación de los parámetros modales de forma experimental, se hizo uso de un martillo, modelo PCB086C03 de la marca PCB Piezotronics, con el cual se excitó el sistema y con un acelerómetro unidireccional, modelo PCB35C22 de marca PCB Piezotronics, se midió la respuesta en frecuencia a la fuerza externa. Posteriormente con el software Cut-Pro se ajustaron los parámetros usando el método de los residuos.

Obtenida la variación de los parámetros, se hizo un cálculo de lóbulos de estabilidad en 3D mediante el programa creado por [10], tomando en cuenta la variación de la dinámica en la pieza debido a la remoción del material, esto es la obtención de la FRF en varias posiciones en la pieza de trabajo, conforme a la trayectoria de mecanizado.

4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

4.1. Primeros ensayos

El espesor inicial de la pieza juega un papel importante desde el punto de vista de condiciones de corte en mecanizado de suelos delgados [10]. Mediante estos primeros ensayos se pretendió definir el espesor inicial de la pieza de trabajo que conllevara la aparición de chatter. Las condiciones de corte fueron las máximas y se pueden observar en la tabla 1.

En el caso de mecanizado de suelos y paredes delgadas, con el objetivo de hacer un proceso productivo, generalmente el programador CAM define la profundidad axial y radial de corte que, por lo general, es igual a la demasia por cuestiones de productividad.

Corte	Velocidad de giro	Avance por filo	Inmersión radial	Espesor inicial de la placa	Espesor final de la placa	Profundidad axial
-------	-------------------	-----------------	------------------	-----------------------------	---------------------------	-------------------

Concordancia	24000 rpm	0.05 mm/diente	62.5 %	2 mm	0.75 mm	1.25 mm
--------------	-----------	----------------	--------	------	---------	---------

Tabla 1. Parámetros de corte. Por cuestiones de productividad la demasía es igual a la profundidad axial

En la tabla 2 se puede observar los espesores empleados en cada ensayo y los resultados obtenidos. La estrategia de mecanizado empleada fue interpolación circular de menor a mayor diámetro.

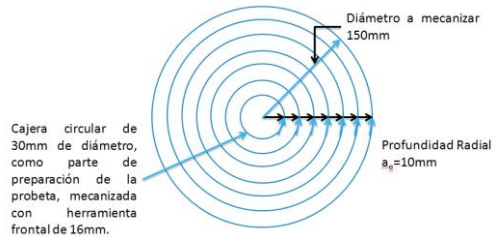
Nº Ensayo	Espesor inicial	Espesor final	Resultado	Metodología de corte
1	9 mm	1 mm	Buen acabado	 Cajera circular de 30mm de diámetro, como parte de preparación de la probeta, mecanizada con herramienta frontal de 16mm. Diámetro a mecanizar 150mm Profundidad Radial $a_r=10\text{mm}$
2	5 mm	1 mm	Buen acabado	
3	2 mm	0.75 mm	Marcas de chatter en casi toda la superficie	

Tabla 2. Ensayos para la definición del espesor inicial de la pieza

En la figura 2 se puede ver la FFT de la señal del acelerómetro en caso estable e inestable. El fenómeno de chatter apareció únicamente para el caso de espesor inicial 2mm, por lo que éste fue el espesor determinado para realizar el estudio de estabilidad.

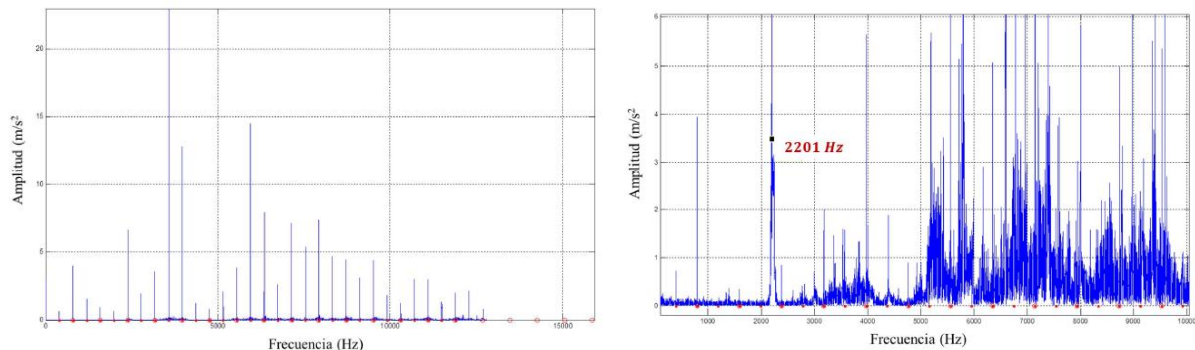


Figura 2. Izq.) Señal tomada por el acelerómetro para un corte estable (ensayo n°2). Dcha.) Corte inestable (ensayo n°3)

4.2. Medición de parámetros modales

Definido el espesor inicial de la pieza (2mm) se dio paso a la medición de los parámetros modales dividiendo la pieza en 32 etapas (ver figura 3). Estas mediciones se hicieron colocando el acelerómetro en la parte superior de la pieza y golpeando a un costado con el martillo de impacto. Se golpeó en 10 ocasiones para asegurar una fiabilidad en los golpes, tratando de mantener la coherencia por encima del 60% y evitando el doble golpe.

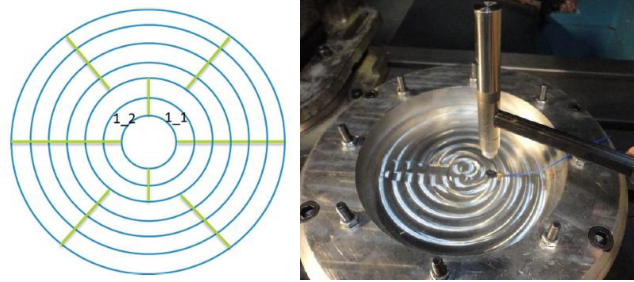


Figura 3. Izq.) División de las etapas en el mecanizado del suelo. Las primeras 2 circunferencias se midieron en 4 etapas, las demás en 6 etapas. Drcha.) Medición de parámetros modales

La figura 4 muestra la variación del amortiguamiento, rigidez y frecuencia en la pieza. Se puede observar que si se tiene un caso de chatter de pieza es necesario tener en cuenta que los parámetros modales medidos en un punto no serán válidos en el resto del mecanizado, tal y como era de esperar.

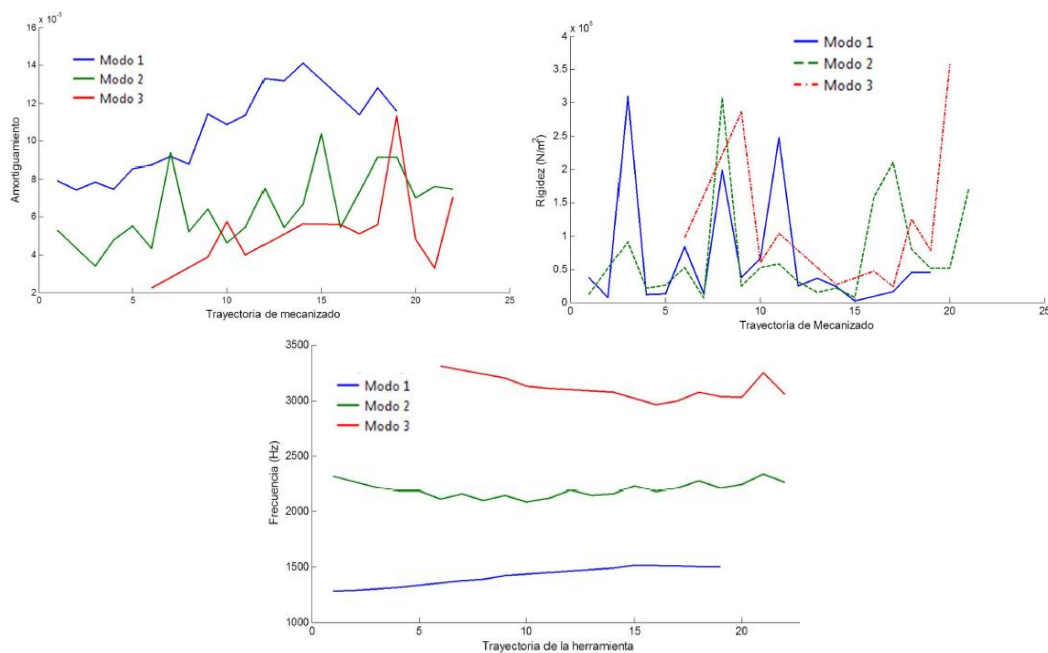


Figura 4. Variación de los parámetros modales con la trayectoria de la herramienta

Las FRF's de la pieza y la herramienta pueden observarse en la figura 5, donde se puede comprobar que en comparación la herramienta presenta una menor rigidez. Esto influye a la hora de realizar los cálculos para los lóbulos de estabilidad, pues el modelo deberá ser de 3 grados de libertad al poder existir vibración en los ejes X, Y, Z.

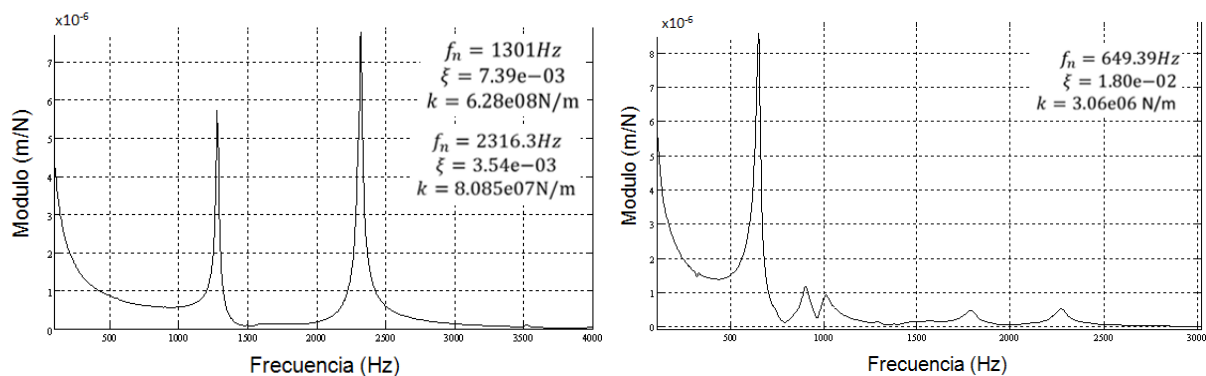


Figura 5. Izq.) FRF de la pieza tomada en la etapa 1_3. Dcha.) FRF de la herramienta

4.3. Obtención de diagramas de estabilidad

Para el cálculo de los diagramas de estabilidad se asumieron una serie de simplificaciones:

- Se supuso un modelo de fuerzas simple, en el que las fuerzas radial, axial y tangencial sobre el filo dependen de la forma lineal del espesor de viruta y de la profundidad de corte.
- No se consideró el *process damping*, ni el *run-out* de la herramienta.
- Sólo cortan los filos principales de la herramienta.

Concluyendo que en el caso de estudio, la única variable es el giro del husillo, pues la profundidad axial es constante (fijada por la geometría final e inicial). Así pues, se realizó un corte en el diagrama 3D a un valor de profundidad axial 1.25mm. De esta manera, se obtuvo el diagrama de la figura 6, donde las zonas granates indican corte estable (profundidad axial mayor o igual a 1.25mm) y las zonas azules indican corte inestable (profundidad axial menor a 1.25mm).

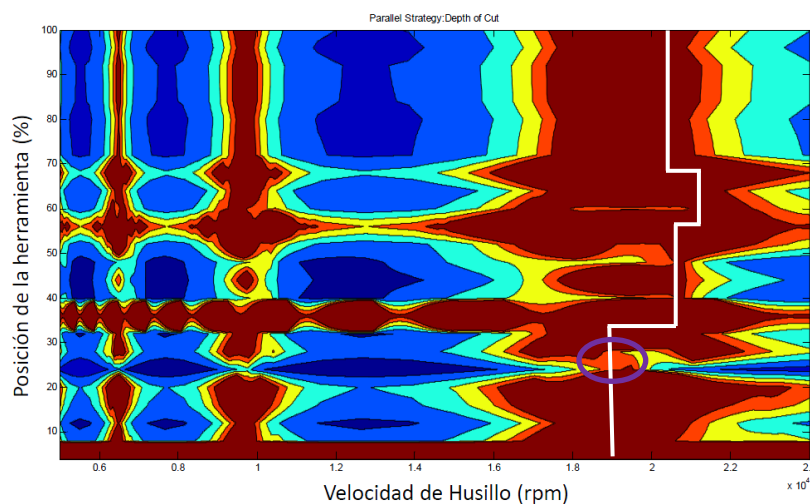


Figura 6. Diagrama de Lóbulos en 3D obtenido para las mediciones tomadas utilizando algoritmo propuesto por [10]

5.4 Resultados

- No se han encontrado velocidades estables superiores a 21000 rpm.
- Para evitar el corte inestable es necesario variar la velocidad de corte durante el mecanizado, tal y como aparece en la figura 6 inscrito en líneas blancas. Decir que para el caso en el que la posición de la herramienta es del 25% es inevitable la aparición de alguna inestabilidad.
- Para asegurar un proceso estable sin cambio de velocidad, los parámetros de corte deben ser disminuidos, con la disminución de productividad que eso conlleva.
- En las piezas de baja masa el acelerómetro puede tener una influencia importante en la medición de parámetros modales que debe ser tomada en cuenta y corregida al momento de hacer el cálculo correcto de lóbulos de estabilidad. Otra opción es utilizar vibrómetro-láser.
- Teóricamente existe chatter de herramienta (ver figura 5), mientras que experimentalmente se ha observado chatter de pieza.

5. SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta para el caso de mecanizado en estructuras flexibles donde las condiciones de corte sean críticas (tabla 1), es la utilización de un amortiguador basado en Fluido Magnetoreológico de la marca LORD.

Se fabricó una almohadilla con el objetivo de dar soporte a la pieza y siendo controlable por el campo magnético, amortiguar las vibraciones en el proceso. Debido a varias pruebas y la experiencia previa se decidió que estuviera hecho de un material elastómero, como el caucho (figura 7).

La almohadilla se colocó encima de una ventosa electromagnética adaptada a las dimensiones del dispositivo de sujeción y ambas fueron introducidas debajo de la pieza. Para proporcionar el voltaje necesario se adquirió un variador de tensión marca Polyflux código EA3000, permitiendo variar el voltaje de 0 a 250 VCA.



Figura 7. Amortiguador de fluido MR sobre ventosa

Se realizaron una serie de pruebas con el amortiguador, en el que hubo que tomar en cuenta diferentes parámetros, como: cantidad de fluido MR en la bolsa que lo contiene, la distancia necesaria entre el amortiguador y la placa, voltaje aplicado y tamaño de la bolsa que contiene el amortiguador. Por ejemplo, si el voltaje fuera excesivo, el campo del fluido MR se saturaría o incluso el fluido aumentaría considerablemente su viscosidad pudiendo tener una fuerza de empuje sobre la placa, flexionándola.

Se mecanizó a un 10% de la capacidad del variador de tensión, es decir, aplicando 25VCD a la ventosa electromagnética. El amortiguador llegó a un estado viscoso, semisólido y se logró la ausencia de chatter, tal y como puede verse en la señal del acelerómetro de la figura 8.

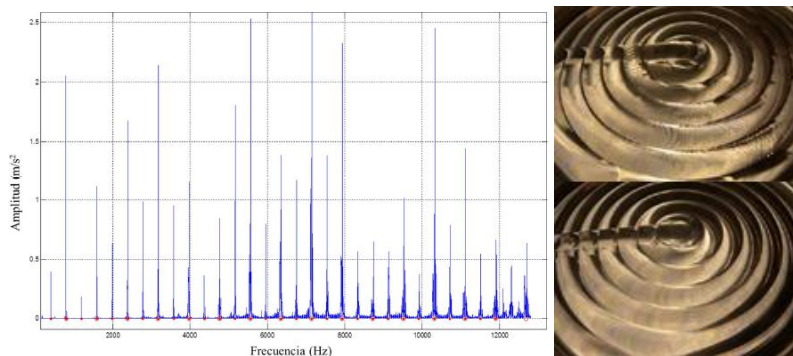


Figura 8. Izq.) Señal del acelerómetro con el amortiguador colocado al 10%. Drcha.) Superficie con marcas de chatter (superior) y superficie mecanizada con fluido magnetoreológico, sin presentar marcas de chatter (inferior)

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se propone el uso de los materiales inteligentes para amortiguar las vibraciones auto-excitadas, siendo este un gran problema al que se enfrenta la industria, permitiendo el mecanizado productivo y con alta calidad. Se propone una nueva metodología para el uso de un amortiguador basado en Fluido Magnetoreológico, el cual no se ha investigado profundamente debido a diversos factores, como que no se ha encontrado como aplicarlo de forma eficaz, ya que al estar en contacto directo con la pieza puede provocar manchas que no son sencillas de remover, pero que puede ser de gran utilidad en supresión de vibraciones.

Se propone que el amortiguador se encuentre contenido en una bolsa de caucho, material que es flexible y resistente, debido a que el aceite del fluido MR contiene aceite que resulta dañino para la mayoría de elastómeros.

El amortiguador propuesto tiene la capacidad de ser intercambiable y puede ser utilizado en cualquier centro de mecanizado. También puede adaptarse a cualquier geometría de pieza, ya sea curva, plana o entrar en cavidades para brindar soporte, lo cual significaría un ahorro en dispositivos de sujeción, tanto en diseño como en fabricación. Aunque no se debe olvidar la importancia de la aplicación del voltaje.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo quieren mostrar su agradecimiento a Eduardo Sasía por su apoyo y su asistencia y también a todas aquellas personas que forman el Grupo de Fabricación de Alto Rendimiento de la ETSI de Bilbao que han colaborado en este estudio.

8. REFERENCIAS

- [1] N.D. Sims, Y. Zhang, *Piezoelectric active control for workpiece chatter reduction during milling*. Smart Structures and Materials 2004: Smart Structures and Integrated Systems. Editado por Alison B. Flatau, Proc. de SPIE 5390 (2004) 335-346
- [2] W.R. Winfough, *Issues of dynamics in high-speed milling of aluminum aircraft structures*. Philosophical Dissertation, Universidad de Florida (1995)
- [3] M. Zatarain, I. Bediaga, J. Muñoa, R. Lizarralde, *Stability of milling processes with continuous spindle speed variation: Analysis in the frequency and time domains, and experimental correlation*. Annals of the CIRP 57-1 (2008) 379-384
- [4] D. Segalman, J. Redmond, *Chatter suppression through variable impedance and smart fluids*. Proceedings of the SPIE- The international Society for Optical Engineering 2721 (1996) 353-363
- [5] M. Wang, R.Y. Fei, *Chatter suppression based on nonlinear vibration characteristic of electrorheological fluids*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 39 (1999) 1925-1934
- [6] D. Mei, T. Kong, A. Shih, Z. Chen, *Magnetoreological fluid-controlled boring bar for chatter suppression*. Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 1861-1870
- [7] S. Çeşmesi, T. Engin, *Modeling and testing of a field-controllable magnetorheological fluid damper*. International Journal of Mechanical Sciences 52 (2010) 1036-1046
- [8] S. Smith, D. Dvorak, *Tool path strategies for high speed milling aluminium workpieces with thin webs*. Mechatronics 8 (1998) 291-300
- [9] J. Fleischer, B. Denkena, *Workpiece and tool handling in metal cutting machines*. Annals of the CIRP 55-2(2006) 817-839
- [10] F. Campa, *Metodología para la predicción de la Estabilidad dinámica en el mecanizado de alta velocidad de suelos delgados*. Tesis doctoral, Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao UPV-EHU (2009)
- [11] E. Budak, *Mechanics and Dynamics of Milling Thin Walled Structures*. PhD. Thesis, The University of British Columbia, Department of Mechanical Engineering, Vancouver, B.C. Canada (1994)
- [12] Y. Altintas, E. Budak, *Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling*. Annals of the CIRP 44-1 (1995) 717-723
- [13] V. Thevenot, L. Arnaud, G. Dessein, G. Cazenave-Larroche, *Influence of material removal on the dynamic behaviour of thin walled structure in peripheral milling*. Machining Science and Technology 10 (2006) 275-287
- [14] V. Thevenot, L. Arnaud, G. Dessein, G. Cazenave-Larroche, *Integration of dynamic behaviour in stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin walled structure milling*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 27 (2006) 638-644