

Capacitación de utillajes flexibles para su uso en procesos de mecanizado de alta calidad: un caso de aplicación del paradigma Industria 4.0

Capacitation of flexibles fixtures for its use in high quality machining processes: an application case of the Industry 4.0 paradigm

Antonio Rubio-Mateos¹, Asun Rivero-Rastrero¹, Irene Del Sol-Illana², Eneko Ukar-Arrien² y Aitzol Lamikiz-Mentxaka³

¹ Tecnalia Research and Innovation (España)

² Universidad de Cádiz (España)

³ Universidad País Vasco (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8824>

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo en el que la tecnología avanza hacia sistemas más sensorizados, la capacidad de incrementar la información sobre las máquinas, procesos y productos se ha asociado históricamente a una mejora de los mismos. Así, el hecho de tener máquinas que integren más sensores lleva a optimizar su rendimiento, a facilitar su mantenimiento y, por consiguiente, alargar su vida útil [1] [2].

Por su parte, tener procesos productivos que incluyan una mayor sensorización y control de parámetros lleva a obtener productos con una mayor calidad, reduciendo los tiempos de fabricación [3]. Paralelamente, tener un mayor grado de monitorización sobre las piezas a fabricar, lleva a acelerar la optimización del desarrollo de producto y, por tanto, a una importante reducción de costes [4].

No obstante, la capacidad de monitorización también posibilita otras opciones tecnológicamente más avanzadas que tradicionalmente no han sido viables y que aportan nuevas oportunidades de fabricación. En este caso, la solución que se presenta hace referencia a un nuevo concepto de utillaje flexible capaz de amarrar piezas de diferentes geometrías.

Los utillajes han sido un elemento clave que ha ido evolucionando para adaptarse a los requisitos que demanda

la Industria. Entre los casos más exigentes en cuanto a requisitos de amarre se encuentran las aplicaciones en las que se trabaja con piezas de baja rigidez, como pueden ser varios elementos estructurales del sector aeronáutico. En estos casos, los utillajes utilizados son de amarre por vacío [5] y están limitados a la sujeción de elementos con una determinada geometría. Sin embargo, la tendencia actual de fabricación flexible de pequeños lotes de piezas basada en "la nube digital" y en sistemas considerados dentro del concepto "Internet of Things" (IoT) [6] inhibe el desarrollo de utillajes dedicados para estos entornos manufactureros emergentes [7].

En este contexto, se presenta un utillaje de vacío basado en la utilización de elementos flexibles de bajo coste que permite el amarre de piezas de diferentes geometrías. Este sistema proporciona una mayor flexibilidad frente a las soluciones existentes, manteniendo un coste de inversión reducido que facilita su implementación en la Industria. No obstante, este desarrollo sólo es viable mediante la integración de tecnologías avanzadas de sensorización y análisis, que permiten una monitorización continua del proceso de mecanizado y del estado de la pieza.

2. NUEVO CONCEPTO DE UTILLAJE FLEXIBLE

Este innovador concepto hace referencia a los utillajes que utilizan láminas flexibles que sirven como apoyo y elemento de amarre por vacío para las diferentes geometrías de piezas. Dada la aplicación de mecanizado, la selección del material es clave para el correcto amarre del producto a mecanizar.

Debido a los requisitos de flexibilidad para poder adaptarse a diferentes geometrías, los elastómeros son una opción adecuada gracias a su gran capacidad de deformación. Por otro lado, dados los cambios térmicos producidos por el avance de la zona de corte, los elastómeros termoestables se presentan como una opción más confiable para mantener una precisión geométrica aceptable. Por último, el hecho de transformar la lámina flexible en una mesa de vacío requiere ciertas propiedades de estanqueidad que hacen de los elastómeros termoestables tipo R la opción idónea para la aplicación.

En este caso, la opción seleccionada ha sido una goma utilizada en aplicaciones de amortiguamiento y aislamiento. Estos tipos de láminas, debido a sus propios procesos productivos, no garantizan una buena precisión de forma, por lo que su aplicación ha sido limitada a aplicaciones que no requieren de precisión geométrica por debajo de 0,1 mm.

No obstante, dado el avance de la técnica y de la implementación de tecnologías de monitorización, cada vez se muestran más soluciones basadas en este mismo concepto [8] [9] [10]. En ellas, un elemento flexible tipo plancha puede utilizarse como elemento de apoyo y amarre para su utilización como utillaje en diferentes procesos de fabricación.

2.1. CLASIFICACIÓN DE UTILLAJES

Tradicionalmente, los utillajes de vacío se han caracterizado por definir un apoyo preciso que derive en un mecanizado de calidad. En el mercado existen soluciones tanto rígidas como capaces de adaptarse a diferentes geometrías. Sin embargo, estas soluciones comerciales siguen lastradas por una falta de flexibilidad a la hora de afrontar diferentes geometrías y por su elevado coste.

Existen diferentes formas de clasificar los utillajes [11] fixtures have a direct impact upon product manufacturing quality, productivity and cost, so much attention has already been paid to the research of computer aided fixture design (CAFD: por los elementos que lo componen, por el sistema de amarre, por la configuración, etc. Sin embargo, a día de hoy, no existe una clasificación en cuanto a las características geométricas de los utillajes de vacío, ya que

este parámetro se encontraba implícitamente unido a su capacidad de adaptación. En este sentido, se propone una nueva clasificación (Fig. 1: *Clasificación utillajes de vacío*), que engloba todas las soluciones de utillajes de vacío, incluyendo el concepto de estudio en este artículo.

Como se aprecia en el esquema anterior, los utillajes de vacío se pueden dividir en dos grupos: los "monomorfos" y los "polimorfos". El concepto "monomorfo" hace referencia a todos aquellos utillajes que se caracterizan por tener una geometría de forma inalterable en el tiempo. La mayoría de estos utillajes son mesas de vacío planas, aunque algunos fabricantes ofertan, además, soluciones *ad-hoc* con la curvatura que se requiera. Este tipo de utillajes se caracteriza, no sólo por su falta de flexibilidad en cuanto a curvatura sino que, además, en aplicaciones de alta calidad, cada producto tiene asociado su propio utillaje. Esto ocurre debido a que el utillaje tiene divididas sus zonas de vacío, por sectores, en función de la operación de mecanizado que tenga asociada. Así, se pueden tener canales de recantado y corte, orificios para poder taladrar y todo ello separado por juntas que mantienen la estanqueidad (Fig. 2-a). Además, cabe destacar que, dado su apoyo uniforme en toda la superficie de la pieza, se utilizan en operaciones de gran precisión, como pueden ser los fresados de alta calidad.

Por el contrario, todos los utillajes que tienen la capacidad de ser adaptados a diferentes geometrías se les puede considerar "polimorfos", esto es, que tienen o pueden tener varias formas. Históricamente, todos los utillajes de vacío que tenían la capacidad de cambiar su configuración lo hacían para ser adaptados a la geometría de la pieza a mecanizar. De ahí viene el concepto "ortomorfo" o, dicho de otra forma, la capacidad de mantener la forma correcta. Estos utillajes comerciales se caracterizan por tener varios actuadores con copas de vacío que se elevan a distintas alturas de tal forma que se pueden adaptar a una gran variedad de curvaturas (Fig. 2: Esquema de utillajes: (a) "monomorfo" y (b) "ortomorfo"-b). Sin embargo, dada la baja rigidez que existe en la zona entre cada apoyo, estos utillajes se limitan a aplicaciones donde sólo se reali-

zan operaciones de corte y recantado, no de fresado.

Como alternativa a las soluciones existentes en el mercado que están englobadas bajo el concepto "ortomorfo", se presentan los utillajes "idiomorfos" (Fig. 3: *Esquema de utillaje "idiomorfo"*). Estos utillajes, debido al proceso de fabricación de las planchas flexibles, se caracterizan por una elevada e impredecible variabilidad de espesor y, por tanto, de forma. De ahí viene el concepto "idiomorfo" o, dicho de otra forma, que tiene una forma única e irrepetible.

Este tipo de utillaje deformable se caracteriza por distribuir el amarre por vacío a través de ranuras a lo largo de toda la pieza, garantizando un anclaje uniforme. Por otro lado, esta solución posibilita su utilización para el amarre de cualquier pieza, independientemente de su contorno, ya que no necesita juntas para mantener el aire confinado. De hecho, para las aplicaciones en las que se requiere mecanizar más allá de la pieza, como puede ser el taladrado, se puede utilizar cualquier lámina de sacrificio que deje pasar el aire, bien porque sea porosa o porque tenga orificios. Además, dado que la rigidez local que muestran este tipo de materiales elásticos es suficiente frente a los bajos esfuerzos de compresión experimentados ante procesos de acabado, es posible fresar manteniendo una buena rugosidad en el fondo de las cajeras.

A diferencia de los utillajes "monomorfos", la forma característica de cada utillaje no puede ser reproducida. No obstante, la flexibilidad que proporcionan los elastómeros permite que los utillajes "idiomorfos" puedan adaptarse a diferentes geometrías, aunque no sea exactamente la que demanda la pieza, como en el caso de los utillajes "ortomorfos". Sin embargo, existe una gran variedad de piezas de baja rigidez que pueden ser deformadas ligeramente sin entrar en régimen plástico, quedando amarradas correctamente.

Es en este punto donde las tecnologías desarrolladas dentro del marco de

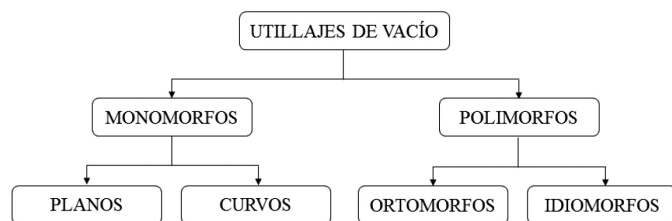


Fig. 1: *Clasificación utillajes de vacío*

Industria 4.0 posibilitan la utilización de este tipo de utillajes para el mecanizado de alta precisión. Mediante la implementación de sensores que monitoricen la posición real de la pieza, se puede actuar mediante un control en lazo cerrado sobre la trayectoria de la herramienta. De esta forma se puede garantizar que el resultado final de la pieza es el correcto.

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL ELEMENTO FLEXIBLE

Tradicionalmente, la caracterización de estos elementos flexibles se ha realizado buscando su respuesta frente a esfuerzos constantes [12], así como ante fenómenos en los que la frecuencia tiene una influencia importante en la deformación del material [13]. En el caso de procesos de mecanizado la herramienta transmite tanto esfuerzos de corte como de avance.

En este caso, el análisis se va a centrar en mecanizados de alta calidad, en los cuales los giros del cabezal superan las 12000 rpm [14], dando como resultado una aplicación de esfuerzos de corte a frecuencias superiores a los 200 Hz. Sin embargo, en los utillajes "idiomorfos" fabricados con goma, la deformación derivada de cargas aplicadas a frecuencias tan altas pueden ser consideradas despreciables debido a las restricciones de los mecanismos internos de deformación y amortiguamiento del material [13]. Por esta razón, los únicos esfuerzos que se van a considerar van a ser los derivados del avance de la herramienta. En el caso de taladrado, se considerarán exclusivamente los esfuerzos de compresión, mientras que, en los ensayos de corte, sólo se tomarán en cuenta los de cizalladura.

Por otro lado, se va a considerar que los diferentes pasos de la herramienta por encima de cada zona están separados entre sí el suficiente tiempo como para suponer que el estado de deformación entre pasadas es el mismo. Esto es, se puede suponer que no hay deformación acumulada derivada de las pasadas anteriores de mecanizado. Además, se va a suponer que la temperatura del conjunto y la velocidad de deformación del material son constantes a lo largo de cada pasada.

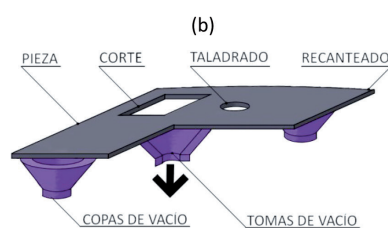
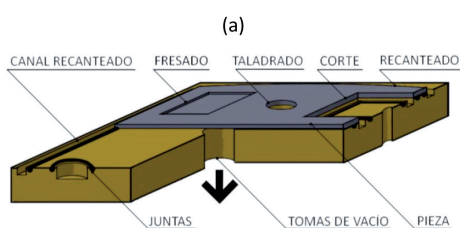


Fig. 2: *Esquema de utillajes: (a) "monomorfo" y (b) "ortomorfo"*

2.2.1. Caracterización estándar

Con el objetivo de caracterizar la compresión de estas láminas flexibles, se han realizado unos ensayos estándar de compresión utilizando una máquina universal E1/044 con capacidad de hasta 10 Tn. La probeta utilizada ha sido una combinación de una lámina cuadrada de goma de 45 mm de lado y 14,2 mm de espesor, junto con un bloque de aluminio que, dados los bajos esfuerzos de la aplicación, se considerará incompresible. Se ha colocado una galga extensiométrica a lo largo del espesor de la goma y se han realizado varias etapas de carga en el conjunto con una velocidad de deformación de 1 mm/min (Fig. 4-a).

En primer lugar, las mediciones muestran que, a partir de cierto desplazamiento de la máquina, el valor de compresión de extensimetría cae de tal forma que su valor se desacopla de los incrementos en desplazamiento y fuerza (Fig. 4-b). Este desacoplamiento se debe a que la medición de deformación mediante extensimetría no es fiable, ya que el abombamiento lateral que sufre la probeta introduce una componente de tracción en la galga que contrarresta la compresión real aplicada.

Por otro lado, esta configuración de ensayo ignora la compresión previa derivada de aplicar vacío entre la pieza y el utillaje. Esta pretensión hace que no se conozca el estado inicial de la goma. Por lo tanto, es necesario realizar ensayos de compresión que tengan en cuenta este efecto.

2.2.2. Caracterización ad-hoc

Para los ensayos *ad-hoc*, se cuenta con un utillaje de vacío "idiomorfo" adherido a la mesa de una fresadora estándar. El utillaje es cuadrado con 300 mm de lado y 14,2 mm de espesor medio. Sobre el mismo se depositan una lámina porosa de 700 µm de espesor y un bloque cuadrado de aluminio de 240 mm de lado que pueden considerarse incompresibles. Las dimensiones de la pieza de aluminio son inferiores a las dimensiones del utillaje para así no tener en cuenta los efectos de borde que se pudieran producir. Por último, la pieza se amarra al utillaje con una presión de vacío de -0,45 bar y al cabezal mediante un adaptador (Fig. 5-a), para así poder realizar movimientos controlados, tanto axialmente, como lateralmente. Además, para monitorizar el desplazamiento real de la pieza, se dispone de un sensor de contacto LVDT colocado en la zona superior o lateral de la pieza en función de que el ensayo sea de compresión o de cortadura. Así, con este banco de ensayos se puede caracterizar el comportamiento real del elemento flexible partiendo de una compresión previa gene-

rada con la aplicación de vacío.

Se realizan diferentes ensayos de compresión y cortadura con una velocidad constante, al igual que en el ensayo estándar, de 1 mm/min y lo suficientemente separados en el tiempo como para no tener en cuenta la deformación acumulada en el material (Fig. 5: (a) Banco de ensayos ad-hoc y (b) resultados de compresión y cortadura-b).

2.3. IMPLEMENTACIÓN COMO MESA DE VACÍO

Con los resultados de la caracterización *ad-hoc* de la goma, se han analizado teóricamente diferentes casuísticas reales de mecanizado. El análisis se realiza teniendo en cuenta que la tensión se relaciona con la carga aplicada a través del área de apoyo de la pieza. Por otro lado, la deformación es el cociente entre la compresión de la goma y el espesor inicial del utillaje. De esta forma se puede estimar el error derivado de la no utilización de tecnologías de monitorización.

Los análisis se van a realizar sobre dos piezas de diferentes características. La primera va a ser una pieza de laboratorio, como la utilizada en la caracterización *ad-hoc*. La segunda va a ser una pieza teórica de baja rigidez definida en función de requisitos reales de las pieles aeronáuticas [10]. Para cada caso, el utillaje correspondiente se considerará con la misma superficie que la pieza y de un espesor de 14,2 mm. Las condiciones seleccionadas (Tabla I) han sido las más exigentes registradas en los ensayos *ad-hoc* y, en el caso de la pieza de laboratorio, corresponden con fuerzas de avance de herramienta

registradas en procesos de mecanizado de aleaciones aeronáuticas [15].

2.3.1. Análisis en operaciones de taladrado

En el caso de taladrado, el efecto que se quiere analizar es el de la recuperación elástica que se produce en el utillaje una vez que la herramienta traspasa la pieza (Fig. 6). Como se aprecia en la imagen, el utillaje sufre una deformación inicial al amarrar la pieza y otra añadida con los esfuerzos del taladrado. Sin embargo, al traspasar la pieza, se produce una repentina recuperación de forma, volviendo al estado de la segunda etapa. Por lo tanto, si no se caracteriza bien esta recuperación, la herramienta podría traspasar también el material de sacrificio y dañar el utillaje.

Las láminas de sacrificio pueden tener una gran variedad de espesores. El caso más desfavorable detectado en el mercado es el de láminas porosas de 700 µm de espesor [16]. En el caso de la pieza de laboratorio, las condiciones tensionales seleccionadas dan como resultado un desplazamiento máximo de 37 mm. Por lo tanto, el margen de espesor que ofrece la lámina de sacrificio garantiza la integridad del utillaje "idiomorfo" sin necesidad de monitorizar el proceso.

Con el objetivo de predecir la compresión del utillaje en casos de grandes deformaciones y dadas las limitaciones de carga de los ensayos *ad-hoc*, se ha realizado una estimación en base a la extrapolación cuadrática de los datos obtenidos. A pesar de que las gomas a compresión tienen diferentes comportamientos en función del

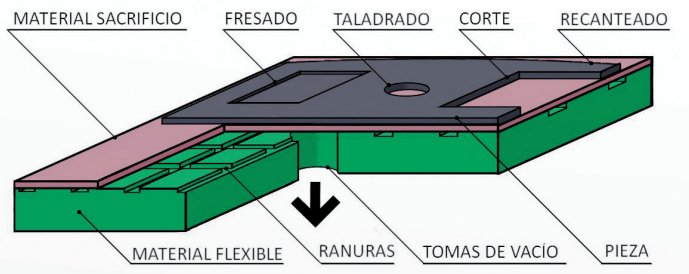


Fig. 3: Esquema de utillaje "idiomorfo"

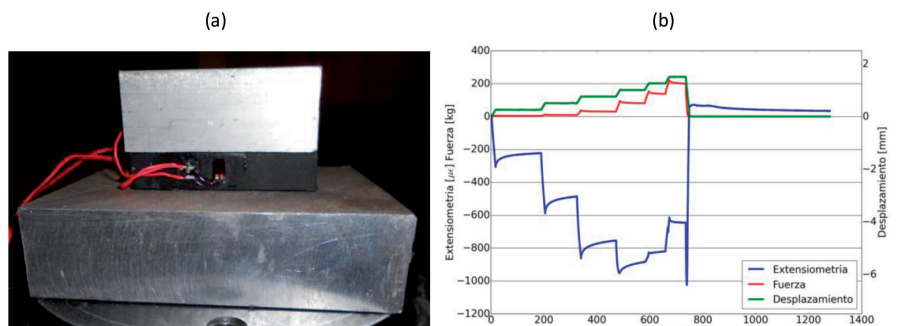


Fig. 4: (a) Probeta y (b) resultados de los ensayos de compresión estándar

Pieza	Área [mm ²]	Espesor [mm]	Tensión [MPa]	Carga [N]	Desplazamiento compresión [μm]	Desplazamiento cortadura [μm]
Laboratorio	5,76 x 10 ⁴	20	0,007	403	37	48
Aeronáutica	14 x 10 ⁶	2		98000		

Tabla 1: Condiciones seleccionadas

rango de carga aplicada [13], se puede considerar que cualquier utillaje fabricado en este tipo de materiales puede caracterizarse por seguir una evolución estable para cargas inferiores a 1 MPa [12]. Esto es, su comportamiento se podría aproximar a través de una interpolación cuadrática.

En base a la interpolación cuadrática Fig. 5: (a) Banco de ensayos ad-hoc y (b) resultados de compresión y cortadura, obtener una compresión de 700 μm, equivale a una deformación de 0,049 y a una tensión de 0,46 MPa. Si se consideran las mismas fuerzas de taladrado seleccionadas antes, el área mínima sobre el que se podría ejercer presión sería de 876 mm². Esta área equivale aproximadamente a la aplicación de fuerzas de avance de una herramienta de Ø32 mm directamente sobre el utillaje. Por lo tanto, en el caso de taladrado de piezas de baja rigidez, con herramientas de diámetros reducidos, será necesario monitorizar el proceso para evitar dañar el utillaje.

2.3.2. Análisis en operaciones de corte

En este caso se realiza un análisis análogo al del taladrado, pero con los esfuerzos de cizalladura. La misma casuística se da cuando la herramienta corta una sección de la pieza. Así, al finalizar la operación de corte, los esfuerzos de mecanizado desaparecen instantáneamente. Esto da pie a un desplazamiento lateral repentino de la pieza.

En el caso aeronáutico antes planteado, para obtener un desplazamiento de 48 μm hace falta aplicar 98 kN. No obstante, aunque este error puede ser crítico, este nivel de cargas es superior a las existentes en el mecanizado de pieles [10] o a otras aplicaciones similares [17]. Por lo tanto, se puede estimar que en aplicaciones reales de corte la recuperación elástica debida al avance de la herramienta será reducida.

Sin embargo, en el caso de la pieza de laboratorio, para obtener un desplazamiento similar, sólo haría falta unas fuerzas de cortadura de 403 N, las cuales sí que pueden darse fácilmente en la industria [17]. En este caso, para fresados o cortes laterales, bajo condiciones agresivas y con piezas de tamaño reducido, será necesario añadir un sistema de monitorización para poder mecanizar la pieza en tolerancias.

3. CAPACITACIÓN DEL SISTEMA PARA MECANIZADOS DE ALTA CALIDAD

En el apartado anterior se han analizado la aplicación de diferentes procesos de mecanizado sobre un utillaje "idiomorfo". En ambos casos se ha demostrado que, sin la necesidad de monitorización, su implementación en ciertas aplicaciones industriales podría ser viable. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones en las que se utiliza utillajes de vacío se refieren a casos en los que además de cortar y taladrar, las piezas requieren varias etapas de fresado.

Por lo tanto, para piezas complejas del sector aeronáutico, no es suficiente con la caracterización inicial del comportamiento del elemento flexible. Esto se debe a que, incluso teniendo un apoyo sobre una mesa de vacío plana, durante el fresado se producen fenómenos de vibraciones y deflexiones de la pieza debido a su baja rigidez [18]. En la mayoría de los casos, estos fenómenos pueden solucionarse a través de la adaptación en las condiciones de mecanizado [19]. Sin embargo, en el caso de utilización de elementos flexibles como utillaje, su propia variabilidad de perfil lleva a errores en el mecanizado que no se pueden compensar a través de las condiciones de mecanizado, sino que

hay que actuar directamente sobre la trayectoria de la herramienta.

Por ejemplo, si a la hora de hacer un corte, la variación del perfil de la goma es superior al espesor de la lámina de sacrificio, es necesario actuar sobre la herramienta para que suba o baje de tal forma que pueda continuar con el mecanizado sin llegar a dañar el utillaje. De la misma forma, si la pieza requiere que una zona sea fresada con tolerancias de espesor muy exigentes, es necesario monitorizar la posición de la pieza. Por lo tanto, en dichos casos, es necesario añadir un sistema de monitorización que posibilite actuar sobre la trayectoria de la herramienta de mecanizado de forma on-line, tal y como se hacen en varios desarrollos industriales [20] [21].

En este caso, se ha realizado un análisis inicial para cuantificar si las interferencias derivadas de la existencia de virutas pueden ser equiparables a los cambios en el espesor del elemento flexible del utillaje. En este sentido el caso seleccionado ha sido el fresado de ranuras. Los ensayos se han realizado con una herramienta esférica de diámetro 10 mm, una velocidad de corte de 75.4 m/min y un avance por filo de 0.06 mm/diente.

Para la monitorización del perfil de la pieza se ha acoplado un láser Acuity AR200 al cabezal de una máquina fresadora, de tal forma que monitoriza por delante de la herramienta en las diferentes trayectorias lineales programadas (Fig. 7-a). Para tener una muestra representativa, se han realizado cinco repeticiones, cubriendo varias zonas con distinto perfil de pieza y diferentes densidades de viruta. La frecuencia de adquisición en todos los ensayos ha sido de 1000 Hz.

A estas mediciones se les ha aplicado un filtrado en el dominio temporal basado en el cálculo de la media móvil de la señal del láser. Este filtro muestra como salida el valor promedio de las últimas muestras:

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k] \quad (1)$$

Este tipo de filtros de respuesta al impulso finito (FIR) son los más comunes en el procesamiento de señales en el espectro temporal debido a su capacidad de reducir el ruido aleatorio [22]. Por lo tanto, en este caso, son útiles para identificar virutas sobre el perfil de la pieza.

Así, con el objetivo de realizar un ajuste con la mayor precisión posible, se ha analizado diferentes grados de filtrado en función del número de puntos tenidos en cuenta en el cálculo de la media móvil (Fig. 7-b).

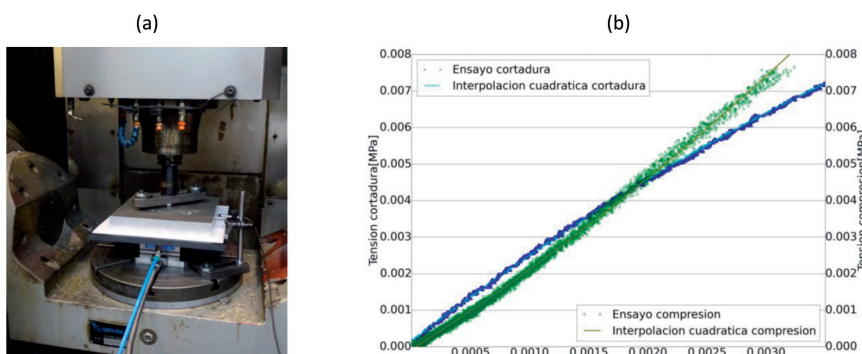


Fig. 5: (a) Banco de ensayos ad-hoc y (b) resultados de compresión y cortadura

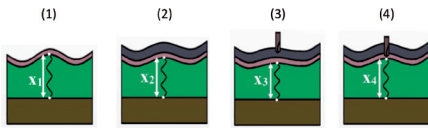


Fig. 6: Etapas de la deformación de la goma durante el amarre de la pieza y su taladrado, donde $x_1 > x_2 > x_3 > x_4$.

Por último, para cada uno de los cinco ensayos, se ha comparado el error máximo entre el perfil sin viruta y la señal obtenida a través de la media móvil para los diferentes grados de filtrado (Fig. 7-c). A su vez, estos errores se han comparado con la tolerancia de espesor límite requerida en aplicaciones como la aeronáutica [10]. El resultado muestra que para las condiciones de fresado analizadas se puede obtener, vía software, una señal filtrada con una precisión en torno a 25 μm , independientemente de la existencia de viruta entre el sensor y la pieza. Por lo tanto, este método de filtrado podría proporcionar calidad suficiente como para poder aplicarlo en aplicaciones de mecanizado de alta calidad.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo se ha centrado en la presentación de un concepto innovador de utillajes de vacío que nace desde la búsqueda de soluciones más ecoeficientes y que, con la implementación del paradigma Industria 4.0, se catapulta como alternativa a soluciones de alta tecnología.

En primer lugar, se ha propuesto una clasificación que tome en cuenta este nuevo tipo de soluciones flexibles y que clarifique la idiosincrasia de cada tipo de utillaje existente. Esa clasificación ha servido como punto de partida para destacar las diferentes características que dan valor al tipo de utillaje propuesto:

- Ecoeficiencia: Se trata de una solución de bajo coste en comparación con las soluciones comerciales existentes.
- Flexibilidad: Es un utillaje de vacío adaptable a diferentes curvaturas que, además, permite el amarre de diferentes piezas, independiente-

mente de la geometría de su contorno.

- Versatilidad: Permite intercalar, en una misma atada, operaciones de recantado, corte o taladrado con otras con requisitos geométricos más exigentes, como el fresado.

Con el objetivo de validar su funcionamiento se ha caracterizado, tanto a compresión como a cortadura, el material elástico del que está compuesto el utillaje para así poder estimar su comportamiento frente a los esfuerzos derivados de los diferentes procesos de mecanizado. No obstante, este análisis se tendrá que completar a través de la caracterización en condiciones de mecanizado reales, y estudiando el efecto de diferentes parámetros del sistema, como por ejemplo la composición del material elástico o el espesor del utillaje.

Por último, se ha definido el marco en el que se amplifica el impacto de este concepto mediante la monitorización del proceso. Así, utilizando tecnología láser se puede monitorizar la posición de la pieza, independientemente de la densidad de viruta existente en el proceso y manteniendo una linealidad en las medidas propias de las aplicaciones industriales más exigentes.

PARA SABER MÁS

[1] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, y C. Zhang, «Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination», *Comput. Netw.*, vol. 101, pp. 158-168, jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>

[2] C. Faller y D. Feldmüller, «Industry 4.0 Learning Factory for regional SMEs», *Procedia CIRP*, vol. 32, pp. 88-91, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.117>

[3] J. Lee, B. Bagheri, y H.-A. Kao, «A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems», *Manuf. Lett.*, vol. 3, pp. 18-23, ene. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

[4] T. Stock y G. Seliger, «Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0», *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 536-541, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>

[5] Y. Zhou, Y. Li, y W. Wang, «A feature-based fixture design methodology for the manufacturing of aircraft structural parts», *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 27, n.o 6, pp. 986-993, dic. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2011.05.002>

[6] D. Wu, M. J. Greer, D. W. Rosen, y D. Schaefer, «Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art», *J. Manuf. Syst.*, vol. 32, n.o 4, pp. 564-579, oct. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.04.008>

[7] A. Gámeros, S. Lowth, D. Axinte, A. Nagy-Sochacki, O. Craig, y H. R. Siller, «State-of-the-art in fixture systems for the manufacture and assembly of rigid components: A review», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 123, pp. 1-21, dic. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2017.07.004>

[8] J. Baigorri Hermoso, «Soporte para el mecanizado de chapas y otros elementos de reducido espesor», ES2354793 A1, 26-ene-2012.

[9] M. Torres Martínez, «Sistema de sujeción para mecanizado de paneles de reducido grosor», ES2258893 A1, 01-sep-2006.

[10] A. Rubio, L. Calleja, J. Orive, A. Mújica, y A. Rivero, «Flexible Machining System for an Efficient Skin Machining», *SAE International*, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2016-01-2129, sep. 2016. <http://dx.doi.org/10.4271/2016-01-2129>

[11] H. Wang, Y. (Kevin) Rong, H. Li, y P. Shaun, «Computer aided fixture design: Recent research and trends», *Comput.-Aided Des.*, vol. 42, n.o 12, pp. 1085-1094, dic. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2010.07.003>

[12] M. Ramezani, Z. M. Ripin, y R. Ahmad, «Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation», *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 3, n.o 3, pp. 196-203, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.11.002>

[13] A. K. Olsson, «Finite element procedures in modelling the dynamic properties of rubber», Department of Construction Sciences, Structural Mechanics, Lund University, Lund, 2007.

[14] I. Del Sol, A. Rivero, J. Salguero, S. R. Fernández-Vidal, y M. Marcos, «Tool-path effect on the geometric deviations in the machining of UNS A92024 aeronautic skins», *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 639-646, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.134>

[15] B. Haddag, S. Atlati, M. Nouari, y A. Moufki, «Dry Machining Aeronautical Aluminum Alloy AA2024-T351: Analysis of Cutting Forces, Chip Segmentation and Built-Up Edge Formation», *Metals*, vol. 6, n.o 9, p. 197, ago. 2016. <http://dx.doi.org/10.3390/met6090197>

[16] «DATRON VacuCard - Zubehör und Verbrauchsmaterial - CNC-Fräswerkzeuge - DATRON Online-Shop». [En línea]. Disponible en: https://datronshop.de/cnc-fraeswerkzeuge/zubehoer-und-verbrauchsmaterial/datron-vacucard.html?utm_source=SiteLink&utm_medium=VacuCard%2B%20Seite&utm_campaign=VacuCard. [Accedido: 04-abr-2018].

[17] G. Bolar, A. Das, y S. N. Joshi, «Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components», *Measurement*, vol. 121, pp. 190-204, jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.015>

[18] S. Herranz et al., «The milling of airframe components with low rigidity: A general approach to avoid static and dynamic problems», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 219, n.o 11, pp. 789-801, nov. 2005. <http://dx.doi.org/10.1243/095440505X32742>

[19] F. J. Campa, L. N. López de Lacalle, A. Lamikiz, y J. A. Sánchez, «Selection of cutting conditions for a stable milling of flexible parts with bull-nose end mills», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 191, n.o 1-3, pp. 279-282, ago. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.023>

[20] E. Abele, K. Schützer, J. Bauer, y M. Pischian, «Tool path adaption based on optical measurement data for milling with industrial robots», *Prod. Eng.*, vol. 6, n.o 4-5, pp. 459-465, sep. 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-012-0383-9>

[21] X. Zuo, B. Li, J. Yang, y X. Jiang, «Integrated Geometric Error Compensation of Machining Processes on CNC Machine Tool», *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 135-140, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.078>

[22] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Pub., 1997.

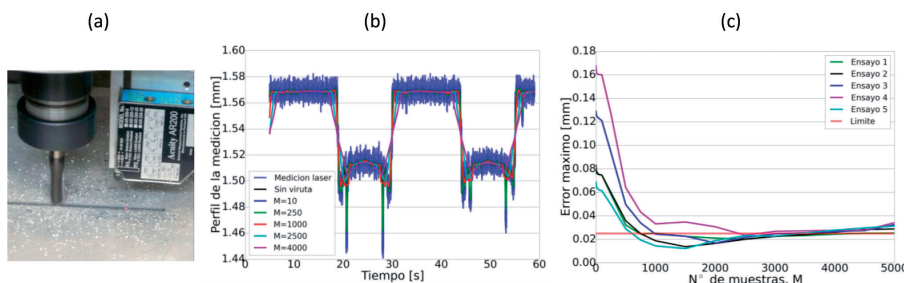


Fig. 7: (a) Banco de ensayos de monitorización con láser y (b) filtrado con media móvil de las interferencias por viruta y (c) comparación de tolerancias

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero por parte del Gobierno Vasco bajo el programa ELKARTEK (Proyecto AERO3NAK, número de concesión KK-2017/00033).