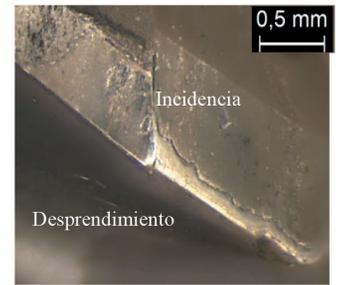


Influencia del nivel de lubricación en el taladrado de apilados híbridos fibra de carbono-titanio aplicando MQL (Mínima Cantidad de Lubricante): monitorización del proceso

Lubrication levels influence on carbon fiber-titanium hybrid stacks drilling applying MQL (Minimum Quantity Lubrication): process monitoring



Juan Fernández-Pérez, José-Luis Cantero, José Díaz-Álvarez y Henar Miguélez

Universidad Carlos III de Madrid. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Av. de la Universidad, 30- 28911 Leganés, Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8992> | Recibido: 03/10/2018 • Inicio Evaluación: 08/10/2018 • Aceptado: 19/11/2018

ABSTRACT

• The purpose of this paper is to analyze the influence of MQL (minimum quantity lubrication) lubrication level on hybrid stacks (Ti/CFRP/Ti) drilling process with diamond coated carbide tools. Spindle and feed motor power consumptions have been monitored which provides valuable information about the operation in real time which can be used to control and optimize the machining process and allows the implementation of 4.0 industry concepts. Furthermore, tool wear has been characterized and hole quality assessed.

The tests were done with two lubrication levels with the same machining centers, tools, materials and cutting conditions as in the drilling processes of aeronautical components.

With the fresh tool, the power consumptions were very similar for both MQL levels considered. Along the carbon fiber layers, the increase of cutting power with tool wear was higher for the test done with the lower MQL level. However, during Ti layers drilling, the increase of power was smaller for the lower MQL level, probably due to a higher titanium adhesion which modifies the chip formation process and a higher influence of the thermal softening effect on the workpiece.

By using a higher MQL level it was found a smaller tool wear. However, the quality of the holes was similar for the both lubrication levels tested.

• **Keywords:** MQL, hybrid stacks drilling, hole quality, tool wear, monitoring.

RESUMEN

En este artículo se describe la influencia del nivel de lubricación MQL (mínima cantidad de lubricante) en el proceso de taladrado de apilados híbridos (Ti/CFRP/Ti) con herramientas de metal duro recubiertas de diamante. Se han monitorizado los consumos de potencia del husillo y del motor de avance lo que aporta valiosa información sobre el proceso en tiempo real aplicable al control y optimización del mecanizado en coherencia con los conceptos de la Industria 4.0. También se ha caracterizado el desgaste de herramienta producido y se ha evaluado la calidad del componente mecanizado.

Los ensayos se realizaron con dos niveles de lubricación empleando las mismas máquinas, herramientas, materiales y condiciones de mecanizado que se emplean industrialmente en el taladrado de componentes aeronáuticos.

Con la herramienta nueva, los consumos de potencia fueron similares para ambos niveles de lubricación. En el taladrado de

las capas de fibra de carbono, el incremento de potencia con el desgaste fue mayor para los ensayos con menor nivel MQL. Sin embargo, en el taladrado de las capas de titanio, el incremento de potencia fue menor para el nivel de MQL bajo, probablemente debido a que la mayor adhesión de titanio provoca una modificación del fenómeno de formación de viruta y una mayor influencia del ablandamiento térmico.

Al emplear mayor nivel de MQL se observó un menor desgaste de la herramienta. Sin embargo, la calidad de los taladros fue similar para ambos niveles de lubricación.

Palabras clave: MQL, taladrado apilados híbridos, calidad agujero, desgaste herramienta, monitorización.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, más del 50% del peso de la estructura de algunos aviones comerciales, como el Boeing 787 o el Airbus 350, están hechos de materiales compuestos, de los que la gran mayoría son CFRP, y en torno al 15% de aleaciones de titanio. La fabricación de un avión requiere realizar una gran cantidad de taladros por lo que la optimización y control de estos procesos tiene una gran relevancia económica. Se estima que durante el 2013, se realizaron más de 1 millón de agujeros en el programa del Airbus 350 [1].

Los apilados híbridos están formados por capas de diferentes materiales, en las que se combinan el uso de metales y materiales compuestos, aunque los más utilizados son las aleaciones de titanio (Ti) y los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP) [2]. Estos destacan por sus excelentes propiedades, y su combinación proporciona al componente las virtudes individuales de cada uno, resultando en gran resistencia y sobresalientes propiedades mecánicas específicas. En contraste, su interacción puede producir corrosión galvánica por lo que es necesaria la aplicación de sellantes [3].

Los materiales compuestos reforzados de fibra de carbono son anisotrópicos, formados por dos fases: las fibras o refuerzos con compartimento frágil y baja conductividad térmica y la matriz que es más dúctil. Por otro lado, las aleaciones de titanio muestran una baja conductividad térmica, un bajo módulo elástico y una alta afinidad química con la mayoría de los materiales de herramientas empleados. En el estudio realizado por Xin *et al.* [4] se analizaron los diferentes modos de desgaste de las herramientas de corte en cada una de las capas, obteniéndose flanco y astillado del filo en el titanio y redondeo del filo en el taladrado de CFRP. Ramulu *et al.* [5] estudiaron procesos de taladrado con herramien-

ta de metal duro y destacaron que este es uno de los materiales de herramientas de corte más adecuados para esta aplicación, en base a la vida de herramienta y a la calidad del componente. Por otra parte, López de Lacalle y Lamikiz [6] destacaron la superioridad de las herramientas de metal duro a nivel económico. Park *et al.* [7] observaron que el principal mecanismo de desgaste del metal duro en apilados fibra/titanio es la adhesión de Ti y desgaste por flanco debido a la dureza de las fibras. También existen trabajos centrados en la influencia de los parámetros de corte en el proceso de taladro híbridos, donde se muestra que la fuerza axial disminuye para mayores avances y el efecto de utilizar picoteado o "peck-drilling" en la rugosidad de la capa de titanio y la de fibra [8]. Otros autores, destacan la influencia del desgaste en la modificación de la geometría de corte y el asociado daño inducido por el mecanizado en las capas de compuesto [9].

El taladrado puede provocar daños en las capas de material compuesto, rebabas en la entrada y en la salida de las capas metálicas y variabilidad en los diámetros debido a los diferentes módulos de elasticidad [10]. Shyha *et al.* [11] analizaron todos los parámetros de calidad requeridos en los componentes híbridos mecanizados para garantizar el adecuado comportamiento de la unión mecánica y evitar el rechazo de estos componentes de alto valor.

El uso de fluidos de corte ha sido, y es actualmente, una práctica extendida. El impacto medioambiental de los fluidos de corte, su efecto sobre el ambiente de trabajo y su coste justifica el interés en reducir o eliminar su utilización [12]. Además, en los procesos de taladrado de materiales híbridos fibra-metal, no es posible emplear técnicas de lubricación convencionales para evitar la contaminación del compuesto. En estas operaciones suele emplearse la técnica de mínima cantidad de lubricante (MQL), la cual permite controlar con gran precisión la aplicación de aceite en función de la posición en la que se encuentre la punta de herramienta, activando la lubricación en las capas metálicas y desactivándola en las capas de material compuesto. Ésta consiste en el uso de aire a alta presión con una pequeña cantidad de lubricante pulverizado para formar un aerosol, que en los procesos de taladrado suele aplicarse directamente en la zona de corte a través de canales de lubricación en el interior de la herramienta [13]. Diversos estudios [14] han demostrado el impacto de aplicar MQL en la calidad del agujero en diferentes procesos de mecanizado. Giasin *et al.* [15] analizaron la influencia del uso de la lubricación MQL en el proceso de taladrado de un apilado formado por capas de aluminio y fibra de vidrio y observaron una reducción de la rebaba a la salida con respecto al taladrado en seco. En otro estudio [16] demostraron una notable mejoría en el acabado superficial y una reducción del par de corte al emplear MQL.

Uno de los principales pilares de la industria 4.0 es la digitalización de los medios de producción como forma para predecir, controlar, planificar y producir de forma inteligente aportando mayor valor a la cadena de producción [17]. En las operaciones de taladrado, este concepto se puede plasmar en la monitorización de distintas magnitudes del proceso: señales de consumo de los motores de la máquina-herramienta, medición de las fuerzas y pares de corte, registro la temperatura del proceso o evaluación en tiempo real de diferentes parámetros de calidad del agujero realizado [18].

El objetivo de este estudio es analizar la influencia del nivel de lubricación MQL por el interior de la herramienta en la calidad del componente mecanizado y el desgaste de la herramienta en el proceso de taladrado Ti/CFRP/Ti con una herramienta de metal duro recubierta de diamante.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El proceso de mecanizado analizado en este artículo consiste en el taladrado de apilados híbridos por lo que se describirán las herramientas de corte y los materiales mecanizados, así como los medios empleados y las condiciones de corte.

2.1. HERRAMIENTA DE CORTE Y MATERIALES

Las herramientas utilizadas son brocas de metal duro K10 con recubrimiento de diamante CK03 del proveedor HAM Präzision. Se trata de herramientas de diseño especial según las especificaciones de Airbus Getafe, con un diámetro de 7,6 mm, 2 filos de corte y punta con ángulo de 140 grados y afilado en cruz (*Split point*). Incluye dos salidas de lubricación en el destalonado frontal de cada uno de los labios.

El material ensayado es un apilado de aplicación aeronáutica Ti/CFRP/Ti, el cual es uno de los más comunes y complejos de mecanizar. Las capas metálicas (Ti) son una aleación de titanio que contiene un 6% de aluminio y un 4% de vanadio (Ti6Al4V). El material compuesto (CFRP) consiste en un polímero reforzado con fibra de carbono formado por diversas capas unidireccionales con diferentes orientaciones, recubierta en su parte superior por una malla de cobre impregnada con resina epoxy y en su parte inferior por una capa de fibra de vidrio también preimpregnada con matriz epoxy.

2.2. CONDICIONES DE MECANIZADO

Los ensayos se realizaron con los mismos medios empleados industrialmente en el taladrado de componentes aeronáuticos.

Se empleó un centro de mecanizado de pórtico con un cabezal MFW 1406/24/2 de Fischer con una potencia nominal de 15.200 W y un motor en el eje de avance de Siemens 1FK7 con una potencia nominal de 940 W, los cuales están sensorizados para medir el consumo de potencia de forma independiente.

Se han analizado dos niveles de lubricación diferentes, correspondientes a las condiciones nominales del equipo Lubrix empleado: un nivel bajo con caudal de lubricante de 3 ml/h y otro con 15 ml/h. Para ambas condiciones se realizaron 40 agujeros.

La Tabla 1 muestra las condiciones de taladrado y el espesor de cada una de las capas del apilado Ti/CFRP/Ti. En el taladrado de titanio se emplean menores velocidad de corte, refrigeración MQL y "peck-drilling" para mitigar la formación de virutas continuas. Durante las capas de material compuesto se interrumpe el caudal de MQL. Debido a que la cantidad de lubricante aplicada durante el taladrado de las capas metálicas es muy reducida, el efecto del aceite residual tendrá un efecto muy limitado sobre el proceso de mecanizado de la capa de CFRP.

El empaquetado se ha realizado aplicando presión con mordazas, para replicar el proceso de montaje de este tipo de componentes. No se utilizan adhesivos entre capas y los sellantes se aplican después del proceso de taladrado

2.3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y DEL DESGASTE DE HERRAMIENTA

Controlar la calidad del taladro realizado es imprescindible para garantizar el cumplimiento de los requisitos de ingeniería que

Material	Espesor (mm)	Velocidad corte (m/min)	Avance (mm/rev)	Lubricacion MQL
Ti	9,3	15	0.05	Sí
CFRP	8,4	70	0.05	No
Ti	9,3	15	0.05	Sí

Tabla 1: Configuración del apilado y parámetros de corte empleados

aseguran el adecuado comportamiento del proceso de fabricación y la unión mecánica.

- Diámetro. La medición se realizó con un micrómetro de interiores Bowers XT3. Se utilizaron patrones calibrados para comprobar la precisión de las mediciones observándose variaciones de $\pm 2 \mu\text{m}$. Se realizaron 3 medidas del diámetro en la entrada y en la salida de cada capa, tomando el promedio como resultado de la medida.
- Rugosidad. La rugosidad de la superficie mecanizada se midió con un perfilómetro de contacto MARWIN XCR20 del fabricante Mahr utilizando un palpador de $5 \mu\text{m}$ con una velocidad de medición de $0,5 \text{ mm/s}$ y una resolución de $0,5 \mu\text{m}$. Se realizaron 3 medidas consecutivas en el interior de cada taladro tomándose como resultado de la medición el valor máximo de rugosidad (R_a) obtenido. Con este criterio se garantiza el cumplimiento de las tolerancias dimensionales exigidas, en base a la norma DIN 4774, la cual indica que ninguna de las medidas debe exceder el valor límite de rugosidad establecido.
- Daños inducidos por el mecanizado. Se inspeccionaron visualmente los taladros para determinar la presencia de daños relevantes de tipo delaminación, arañado por efecto de las virutas metálicas o fibras arrancadas.
- Rebaba. Este fenómeno es característico de las capas de material metálico y se produce a la entrada y la salida del agujero. Se empleó un reloj comparador Mitotuyo 2046S realizándose varias medidas sobre el mismo taladro para determinar el valor máximo. Se obtuvieron repetibilidades en las medidas de en torno a $0,05 \text{ mm}$.

La caracterización del desgaste de la herramienta se realizó utilizando un microscopio óptico OPTIKA SZR.

3. RESULTADOS

Como se ha indicado, para evaluar el proceso de taladrado con diferentes niveles de lubricación se ha analizado el desgaste de las herramientas, la calidad de los agujeros realizados en el apilado Ti/CFRP/Ti y los consumos de potencia de los motores de rotación del husillo y de avance.

3.1. DESGASTE DE HERRAMIENTA

En ambas condiciones de lubricación se observa una pérdida del recubrimiento de diamante por delaminación que afecta a toda la longitud de los filos de la broca y también a la zona de la faja (lateral de la broca). Esto provoca una reducción de la dureza y de la resistencia a la abrasión de la herramienta en estas zonas, como ya destacaron otros autores [19]. Este fenómeno está relacionado con las elevadas temperaturas producidas en el taladrado del titanio, las cuales inducen tensiones térmicas en el recubri-

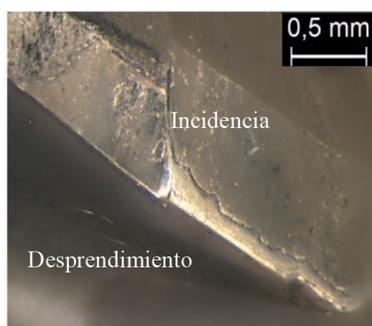


Fig. 1: Pérdida del recubrimiento de diamante por delaminación en la superficie de desprendimiento de la herramienta ensayada con mayor nivel de lubricación MQL (15 ml/h) después de 40 agujeros

miento. Además, la fluctuación de las fuerzas de corte durante el mecanizado de la capa de CFRP y las geometrías de herramienta típicas en estos procesos agravan este modo de desgaste [20]. La Figura 1 muestra en detalle la pérdida de recubrimiento por delaminación en la superficie de incidencia después de 40 agujeros.

En la Figura 2 se muestra el desgaste de las herramientas después de 40 agujeros para las 2 condiciones de lubricación MQL consideradas. En ambas condiciones se observan tipos de desgaste similares, aunque con roturas algo más severas en el caso de la herramienta ensayada con menor nivel de MQL. En concreto, se aprecia pérdida del recubrimiento de diamante por delaminación y roturas frágiles en los filos principales, que afectan especialmente a posiciones cercanas al eje de la herramienta. En la herramienta correspondiente a menor nivel de lubricación también se observa una rotura relevante en la esquina del filo (Figura 2.b). El desprendimiento del recubrimiento afecta a todo el filo principal y a la zona activa del filo secundario, con tamaños de delaminación de hasta $0,25 \text{ mm}$ tanto en la superficie de incidencia como de desprendimiento, siendo similar para ambas condiciones de lubricación.

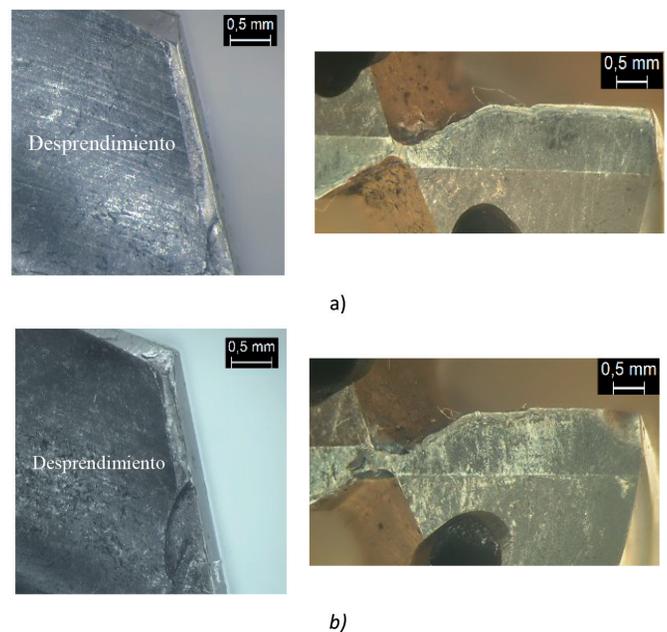


Fig. 2: Desgaste de herramienta ensayada con diferentes niveles de lubricación tras 40 agujeros. a) Nivel alto de lubricación MQL (15 ml/h); b) Nivel bajo de lubricación MQL (3 ml/h)

Además de los desgastes geométricos descritos, también se produce adhesión de titanio, especialmente en la herramienta ensayada con menor nivel de MQL, debido a las mayores temperaturas en la zona de corte y a la mayor fricción entre la herramienta y la viruta. Este efecto del nivel de lubricación MQL también ha sido descrito por otros autores [21,22].

3.2. CALIDAD DE LOS TALADROS

La Figura 3 muestra las mediciones del diámetro del agujero en las capas de titanio de la parte superior e inferior del apilado, nombradas como Ti1 y Ti2 respectivamente, y la capa de CFRP, con una medida en la zona de entrada y otra en la salida.

Para los dos niveles de lubricación, el diámetro en ambas capas de titanio muestra valores muy similares y se mantiene estable con el desgaste de la herramienta.

En relación con los taladros en la capa de fibra, con la herramienta nueva, el diámetro es mayor para los ensayos con menor nivel de lubricación. Esto se debe principalmente a que en esa

condición se generan mayores temperaturas en el taladrado de las placas de titanio [23], produciendo virutas continuas largas que agrandan los taladros en la capa de fibra al ser desalojadas de la zona de corte. La modificación de la geometría de herramienta debido al desgaste se corresponde con geometrías de filo más negativas, provocando virutas discontinuas, independientemente del nivel de lubricación [11], por lo que a que a partir del taladro número 30 los diámetros de los agujeros en la capa de fibra son similares para ambos niveles de MQL. En línea con estas observaciones, para el mayor nivel de lubricación, el diámetro de los taladros en la capa de fibra y de titanio son similares y se mantienen estables con el desgaste.

En general, las diferencias del diámetro a la entrada y a la salida de la capa de fibra no son muy relevantes, aunque siempre son algo mayores los diámetros a la salida. Esto es debido al mayor efecto en esa zona del rozamiento de las virutas de la capa inferior de titanio durante su evacuación [24].

Los valores de la altura de rebaba, representados en la Figura 4, revelan pocas variaciones entre los niveles de lubricación ensayados. Con la herramienta nueva, muestran valores en torno a 0.05 mm a la entrada del apilado y 0.1 mm a la salida. Según evoluciona el desgaste de herramienta, la rebaba a la entrada aumenta

hasta 0.15 mm y la de la salida del apilado llega a alcanzar valores cercanos a 0.4 mm. En ambos casos son valores aceptables [25], aunque de cara al proceso de montaje, es necesario un proceso de rebabado [26].

En la Figura 5 se muestran las rugosidades (valor Ra) para la capa de CFRP y las de titanio. En los materiales compuestos, el modo de formación de viruta, que depende de la orientación de las fibras con respecto al filo de corte, tiene una influencia significativa en el acabado superficial [27]. Debido a este efecto, la rugosidad obtenida durante el taladrado es alta y variable. Además, en este caso, podría verse afectada por la acción de las virutas de titanio desalojadas durante el taladrado [28]. En cuanto a la rugosidad en las capas de titanio, está en torno a 1 μm durante los 40 agujeros realizados. No se observa influencia del nivel de lubricación, ni del desgaste de herramienta en la calidad superficial obtenida.

En ningún caso se observan delaminaciones significativas a la entrada o a la salida ni ningún tipo de daños inducidos por el mecanizado o degradación térmica del material compuesto.

3.3. CONSUMO DE POTENCIA

La señal de consumo de potencia medida incluye los rozamientos del motor y la propia potencia neta requerida para realizar el arranque de material, además de ruido, es por ello, que se aplica un filtro de paso bajo con una frecuencia de filtrado de 10 Hz. Durante el taladrado de las capas de titanio se realizan sucesivas entradas y salidas (peck-drilling) para facilitar la rotura de las virutas. Esto provoca disminuciones de la potencia consumida. Por otra parte, en el taladrado de la capa de fibra se observan grandes oscilaciones, debido a las fluctuaciones de las fuerzas de corte producidas durante el mecanizado de materiales reforzados con fibras [29].

Durante el taladrado de las placas de titanio, el consumo de potencia, es en torno a un 10% de la potencia nominal del motor, siendo muy similar en ambas capas (en lo sucesivo se indicarán los valores medios de potencia correspondientes a ambas capas de titanio). En la capa de CFRP el consumo de potencia es un orden de magnitud inferior al encontrado en las capas de titanio, alrededor de un 1% de la potencia nominal del motor.

Para obtener el valor característico las señales separadas por capas, se ha generado un algoritmo que las procesa automáticamente y

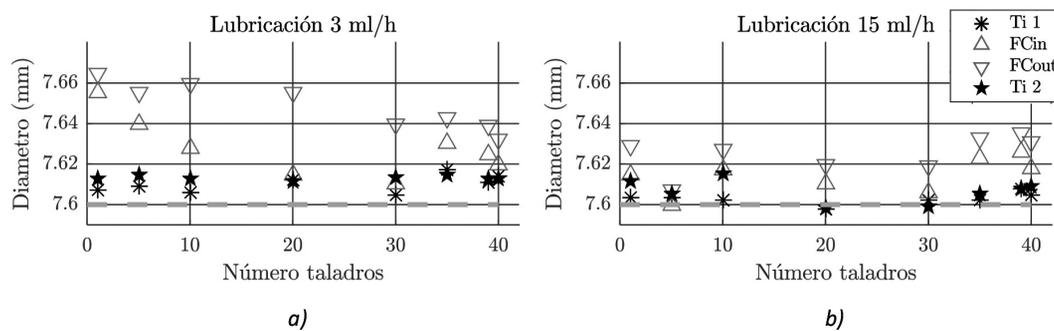


Fig. 3: Diámetro de los taladros del apilado híbrido después de 40 agujeros con 3 ml/h de lubricación en a) y con 15 ml/h en b). La línea gris punteada indica el diámetro teórico de la herramienta

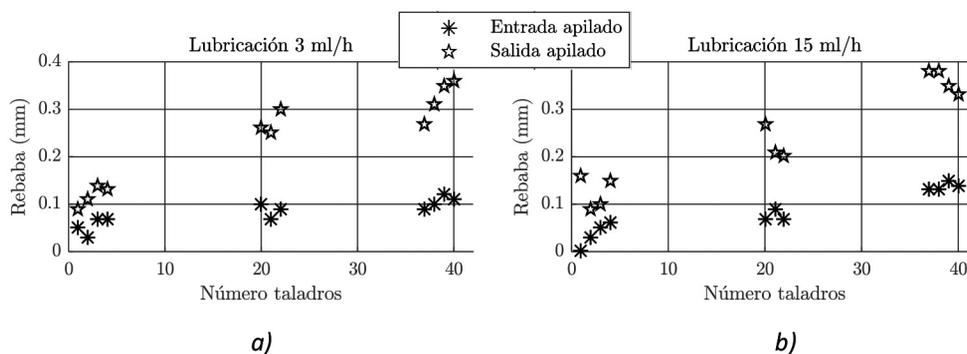


Fig. 4: Rebaba a la entrada y la salida de los agujeros en el apilado híbrido después de 40 agujeros con 3 ml/h de lubricación en a) y con 15 ml/h en b)

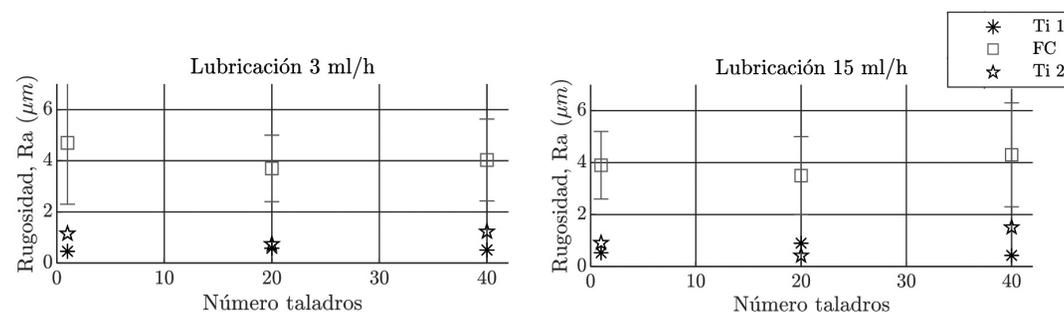


Fig. 5: Rugosidad (Ra) del apilado híbrido después de 40 agujeros con dos niveles de lubricación

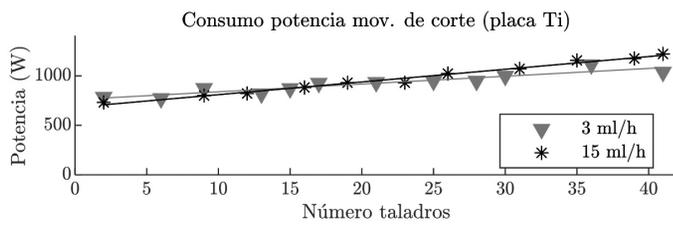


Fig. 6: Consumo de potencia del husillo principal a lo largo de 40 taladros para un apilado Ti/CFRP/Ti

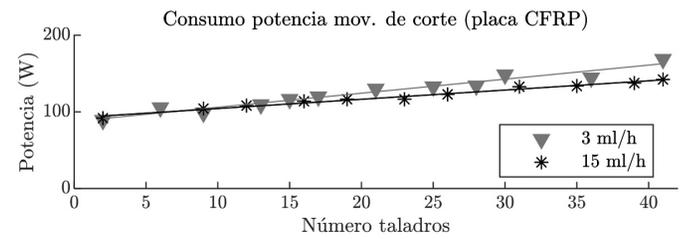


Fig. 7: Consumo de potencia del motor de avance a lo largo de 40 taladros para un apilado Ti/CFRP/Ti

que toma los valores promedios en las zonas de taladrado continuo. En todos los casos se ha eliminado el valor de la señal medida en vacío.

La evolución del consumo de potencia del husillo principal (movimiento de corte) a lo largo de los cuarenta taladros realizados se muestra en la Figura 6. Se puede ver que con la herramienta nueva no hay diferencias en las potencias consumidas durante la parte del proceso en la que se taladra la capa de fibra, ya que esta se realiza en seco en ambos casos. Sin embargo, el consumo de potencia en la parte del proceso en la que se taladran las capas metálicas es algo menor al emplear mayor nivel de MQL debido a la reducción del rozamiento [30,16].

En todos los casos, el desgaste de la herramienta provoca un incremento de la potencia consumida, pero el efecto del nivel de MQL sobre la velocidad de crecimiento de este con el desgaste es distinto en el taladrado de la capa de titanio y de fibra.

Durante el taladrado de titanio, el incremento del consumo de potencia del movimiento de corte con el desgaste es más acelerado en la condición de mayor lubricación (incremento del 76%) y más suave para el menor nivel MQL (incremento del 38%). Esto podría estar relacionado con una mayor adhesión de titanio, motivado por una fricción viruta-herramienta más alta y mayores temperaturas en la condición de menor nivel de lubricación, [31] lo que provocaría una modificación del fenómeno de formación de viruta y una mayor influencia del ablandamiento térmico [32], reduciendo el incremento de las fuerzas de corte en consecuencia.

En la capa de CFRP, no se emplea MQL y el fenómeno del ablandamiento térmico tiene un papel menos relevante. Esto provoca que los mayores incrementos de consumo del movimiento de corte se den en la condición de menor nivel de lubricación debido al mayor desgaste. En este caso, los incrementos de potencia en el taladrado de las capas de titanio son de un 88% con el menor nivel de lubricación y de un 56% con el mayor.

El consumo de potencia del movimiento de avance se muestra en la Figura 7. El incremento del consumo de potencia de avance con el desgaste es más acelerado en la condición de mayor lubricación y más suave para el menor, debido al mismo fenómeno explicado anteriormente para el consumo en el husillo. Después de 40 taladros, el consumo de potencia de avance aumenta un 24% y un 61% para los niveles de lubricación de 3ml/h y 15 ml/h respectivamente.

En el taladrado del CFRP, el nivel de consumo de potencia de avance es muy bajo, en torno a un 0.05% de la potencia nominal del motor, por lo que no hay sensibilidad suficiente para extraer conclusiones fiables.

3.4. APLICACIÓN AL CONTROL DEL PROCESO DE TALADRADO

Las tendencias descritas en este trabajo en relación con los consumos de potencia, desgaste de herramientas y calidad del taladro son aplicables al desarrollo de modelos predictivos que permitirían el control en tiempo real del proceso. Posibles aplica-

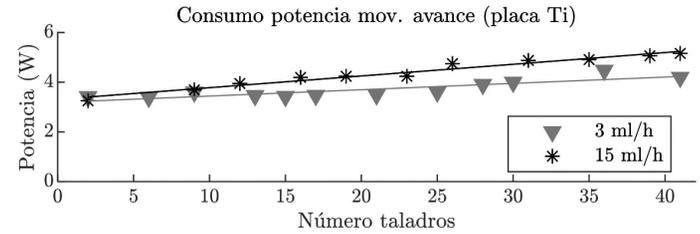


Fig. 8: Monitorización y control del proceso de taladrado en entornos orientados al concepto Industria 4.0

ciones podrían ser monitorizar el diámetro del agujero para detectar valores fuera de tolerancia, predecir delaminaciones o rebabas excesivas e identificar la necesidad de cambio de herramienta por rotura o desgaste, orientado a maximizar el aprovechamiento de las herramientas de corte y evitar la realización de taladros de calidad insuficiente.

En la Figura 8 se muestra el esquema propuesto para la monitorización y control de en un proceso industrial de taladrado de apilados híbridos. Estas estrategias se enmarcan concepto Industria 4.0.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en los ensayos de taladrado de apilados híbridos (Ti/CFRP/Ti) con diferentes niveles de lubricación MQL por el interior de la herramienta se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El modo de desgaste predominante es la pérdida del recubrimiento de diamante por delaminación debido a tensiones térmicas inducidas por las diferencias entre coeficientes de expansión térmica de la capa de diamante y el sustrato de metal duro. Además, la fluctuación de las fuerzas de corte durante el mecanizado de la capa de CFRP y las geometrías de herramienta típicas en estos procesos agravan este modo

de desgaste. Esto debilita el filo de la herramienta y motiva la aparición de roturas frágiles. También se ha identificado la adhesión de titanio, especialmente en los ensayos con menor nivel de lubricación.

- En general, los valores de rugosidad y las rebabas obtenidas no se ven influenciados significativamente por el nivel de lubricación MQL empleado. Sin embargo, en la condición de menor lubricación se observa una mayor dispersión en el diámetro del taladro en la capa de fibra.
- Los consumos de potencia muestran un comportamiento característico durante el taladrado de las capas de titanio. Inicialmente, la condición de mayor nivel de lubricación tiene menos consumo debido al menor rozamiento inducido por el lubricante. Sin embargo, esta relación se invierte con la evolución del desgaste de la herramienta debido a cambios en las condiciones tribológicas viruta-herramienta y al ablandamiento térmico del titanio. Por otro lado, en la fibra no es significativo el efecto del ablandamiento térmico y los mayores incrementos de potencia consumida se observan para la condición de menor lubricación debido al mayor desgaste de herramienta.

REFERENCIAS

[1] Composites Forecasts and Consulting. "Global Markets for Carbon Fiber Composites: 2013-2022" Available online: <https://compositesforecasts.com/2014-2023-global-composite-aerostructures-market-outlook-2-2/> (accessed on Oct 20, 2018)

[2] Zweben C. "Advanced composites for aerospace applications: a review of current status and future prospects". *Composites*. 1981. Vol.12. no.4. p.235-240. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(81\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0010-4361(81)90011-2)

[3] Xu J, Mkaddem A, El Mansori M. "Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: a state-of-the-art review". *Composite Structures*. 2016. Vol.135. p.316-338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>

[4] Wang X, Kwon P Y, Sturtevant C, et al. "Comparative tool wear study based on drilling experiments on CFRP/Ti stack and its individual layers". *Wear*. 2014. Vol.317. no.1-2. p.265-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.05.007>

[5] Ramulu M, Branson T, Kim D. "A study on the drilling of composite and titanium stacks". *Composite Structures*. 2001. Vol.54. no.1. p.67-77. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00071-X)

[6] López-de-Lacalle L N, Lamikiz A. "Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics". *Advanced Materials Research*. 2010. Vol.83-86. p.49-55. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.49>

[7] Park K H, Beal A, Kim D, et al. "Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools". *Wear*. 2011. Vol.271. no.11-12. p.2826-2835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.038>

[8] Kuo C L, Soo S L, Aspinwall D K, et al. "Development of single step drilling technology for multilayer metallic-composite stacks using uncoated and PVD coated carbide tools". *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol.31. p.286-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.026>

[9] Fernández-Pérez J, Cantero J L, Díaz-Álvarez J, et al. "Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling". *Composite Structures*. 2017. Vol.178. p.157-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.043>

[10] Kim D, Beal A, Kang K, et al. "Hole quality assessment of drilled CFRP and CFRP-Ti stacks holes using polycrystalline diamond (PCD) tools". *Carbon letters*. 2017. Vol.23. p.1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.5714/CL.2017.23.001>

[11] Shyha I S, Soo S L, Aspinwall D K, et al. "Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011. Vol.51. no.7-8. p.569-578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.04.007>

[12] Weinert K, Inasaki I, Sutherland J W, et al. "Dry machining and minimum quantity lubrication". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2004. Vol.53. no.2. p.511-537. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60027-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60027-4)

[13] Sharma A K, Tiwari A K, Dixit A R. "Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review". *Journal of cleaner production*. 2016. Vol.127. p.1-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.146>

[14] Sidik N A C, Samion S, Ghaderian J, et al. "Recent progress on the application of nanofluids in minimum quantity lubrication machining: A review".

International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol.108. p.79-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.105>

[15] Giasin K, Ayvar-Soberanis S, Hodzic A. "The effects of minimum quantity lubrication and cryogenic liquid nitrogen cooling on drilled hole quality in GLARE fibre metal laminates". *Materials and Design*. 2016. Vol.89. p.996-1006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.049>

[16] Giasin K, Ayvar-Soberanis S, Hodzic A. "Evaluation of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication effects on machining GLARE laminates using design of experiments". *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol.135. p.533-548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.098>

[17] Ahuett-Garza H, Kurfess T. "A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing". *Manufacturing Letters*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.011>

[18] Ochoa A C, Barrio H G, Teijeiro R P, et al. "Máquinas multitarea: evolución, recursos, procesos y programación". *Dyna*. 2017. Vol.92. no.6. p.637-642. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8237>

[19] Ilescu D, Gehin D, Gutierrez M E, et al. "Modeling and tool wear in drilling of CFRP". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010. Vol.50. no.2. p.204-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.10.004>

[20] Kuo C, Wang C, Ko S. "Wear behaviour of CVD diamond-coated tools in the drilling of woven CFRP composites". *Wear*. 2018. Vol. 398. p.1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.11.015>

[21] Chowdhury M S I, Chowdhury S, Yamamoto K, et al. "Wear behaviour of coated carbide tools during machining of Ti6Al4V aerospace alloy associated with strong built up edge formation". *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol.313. p.319-327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.115>

[22] Bhowmick S, Lukitsch M J, Alpas A T. "Dry and minimum quantity lubrication drilling of cast magnesium alloy (AM60)". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010. Vol.50. no.5. p.444-457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2010.02.001>

[23] D'Orazio A, El Mehtedi M, Forcellese A, et al. "Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools". *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol.30. p.582-592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.019>

[24] Wang C Y, Chen Y H, An Q L, et al. "Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015. Vol.16. no.8. p.1689-1697. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0222-y>

[25] Abdelhafeez A M, Soo S L, Aspinwall D K, et al. "Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys". *Procedia CIRP*. 2015. Vol.37. p.230-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.019>

[26] Ton T P, Park H Y, Ko S L. "Experimental analysis of deburring process on inclined exit surface by new deburring tool". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2011. Vol.60. no.1. p.129-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.124>

[27] Koenig W, Wulf C, Grass P, et al. "Machining of fibre reinforced plastics". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 1985. Vol.34. no.2. p.537-548. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60186-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60186-3)

[28] Xu J, El Mansori M. "Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks". *Composite Structures*. 2016. Vol.157. p.461-482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.025>

[29] Dipaolo G, Kapoor S G, Devor R E. "An experimental investigation of the crack growth phenomenon for drilling of fiber-reinforced composite materials". *Journal of engineering for industry*. 1996. Vol.118. no.1. p.104-110. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2803629>

[30] Jun S C. "Lubrication effect of liquid nitrogen in cryogenic machining friction on the tool-chip interface". *Journal of mechanical science and technology*. 2005. Vol.19. no.4. p.936-946. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02919176>

[31] Díaz-Álvarez J, Tapetado A, Vázquez C, et al. "Temperature measurement and numerical prediction in machining inconel 718". *Sensors*. 2017. Vol.17. no.7. p.1531. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17071531>

[32] Parida A K. "Simulation and experimental investigation of drilling of Ti-6Al-4V alloy". *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.07.001>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del trabajo, disponibilidad de la máquina en la que se han realizado los ensayos y suministro de los materiales y herramientas empleados a AIRBUS DEFENCE AND SPACE mediante el proyecto DRILLING PROCESSES IMPROVEMENT FOR MULTI MATERIAL CFRP-AL-TI STACKS y al MINISTERIO DE ECONOMIA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD mediante la ayuda para personal técnico de apoyo referencia PTA2015-10741-I y el proyecto del plan estatal DPI2017-89197-C2-1-R.