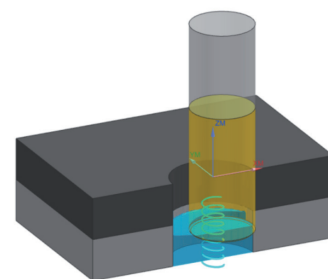


Taladrado de materiales compuestos: problemas, prácticas recomendadas y técnicas avanzadas



Drilling of composite materials: problems, recommended practices and advanced techniques



Unai Alonso-Pinillos, Frank-Andrés Girot-Mata, Roberto Polvorosa-Teijeiro, Luis-Norberto López-de-Lacalle-Marcaide

Universidad del País Vasco UPV/EHU. Escuela de Ingeniería de Bilbao. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Alda. Urquijo, s/n - 48013 Bilbao

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8106> | Recibido: 12/07/2016 • Evaluado: 21/09/2016 • Aceptado: 08/11/2016

ABSTRACT

- The components made of composite and hybrid materials such as composite- titanium laminates are increasing in the aerospace sector. Among the different machining processes, drilling is especially relevant due to the high number of operations that have to be performed and the consequences of the damages that can be originated in the workpiece. Thus, it is essential to understand the particularities of these new materials and advance in the development of new drilling techniques. The objective of this article it to provide a comprehensive review of the key aspects that must be considered when drilling composites and composite-titanium laminates. Emphasis is given to the possible damages in the material surface and to the wear mechanisms of the cutting tool. Moreover, several recommended practices are presented and three advanced techniques are described: orbital drilling, peck drilling and vibration-assisted drilling.
- **Keywords:** drilling, CFRP, stacks, wear, orbital drilling, vibration-assisted drilling.

RESUMEN

El sector aeroespacial requiere cada vez de un mayor volumen de piezas fabricadas en compuesto y en materiales híbridos como los stacks compuesto-titanio. Entre los diferentes procesos de mecanizado, el taladrado es especialmente relevante debido al elevado número de operaciones a realizar y a las consecuencias de los daños generados. Por ello, comprender las particularidades de estos nuevos materiales y avanzar en el desarrollo de nuevos procesos de taladrado resulta imprescindible. Este artículo tiene como objetivo ofrecer al lector una visión global de los diferentes aspectos a tener en cuenta en el taladrado de materiales compuestos y stacks. Así, se hace especial hincapié en los principales daños a evitar en la superficie del material y en los mecanismos de desgaste de la herramienta. Además, se presentan una serie prácticas recomendadas de cara a obtener agujeros de mejor calidad y se describen tres técnicas avanzadas de taladrado: el taladrado orbital, el peck drilling y el taladrado asistido por vibraciones

Palabras clave: taladrado, CFRP, apilados, desgaste, taladrado orbital, taladrado asistido por vibraciones.

1. INTRODUCCIÓN

Los componentes de compuesto en la industria aeronáutica y, especialmente, en la aviación comercial se han incrementado

exponencialmente como consecuencia del mayor conocimiento de sus características en servicio y de la mejora en el cálculo estructural. Si bien se empezaron utilizando en carenados y piezas como los spoilers, han comenzado a fabricarse en compuesto elementos estructurales como el *Center Wing box* y su uso está extendiéndose a las partes frías del motor. Por ejemplo, en el Airbus A350 el porcentaje de material compuesto supera ya el 50%.

Las calidad de las uniones entre las diferentes partes de la estructura depende en gran medida de la calidad del los agujeros. Sin embargo, las características especiales de los compuestos como la naturaleza abrasiva de las fibras o el hecho de que se comporten de forma anisótropa dificultan su mecanizado. Además, se han de evitar daños como la delaminación o el arranque de las fibras pues provocan una disminución de la vida a fatiga de la pieza.

El uso de *stacks* formados por láminas de compuesto y metal (generalmente aluminio o titanio) permite mejorar las propiedades mecánicas de la pieza manteniendo un peso reducido. Este tipo de materiales son empleados, por ejemplo, la zona de conexión entre las alas y el fuselaje del nuevo Boeing 787 Dreamliner.

La lámina de compuesto y la de metal se taladran en una única operación con el objetivo de minimizar el tiempo de mecanizado y los errores de posicionamiento. Sin embargo, estas operaciones son aún más complicadas debido a las diferentes propiedades mecánicas y térmicas de ambos materiales.

2. PRINCIPALES PROBLEMAS EN LA CALIDAD DEL AGUJERO

2.1. LA DELAMINACIÓN EN EL TALADRADO DE COMPUESTOS

A diferencia de los metales, la calidad del agujero viene determinada no sólo por la rugosidad superficial y la precisión dimensional sino principalmente por el nivel de delaminación producido. Además, este defecto es el que posee una mayor repercusión en las propiedades mecánicas de la pieza taladrada [1].

La delaminación puede producirse bien a la entrada de la herramienta en la pieza o bien a la salida de ésta (ver Fig. 1), pero los mecanismos físicos que dan lugar a éste fenómeno son diferentes en cada caso. Durante la entrada de la herramienta, la fuerza de corte tiende a desplazar las fibras en sentido ascendente hacia el canal helicoidal de la broca produciéndose una flexión en las láminas próximas a la superficie. En la salida, la componente axial de la fuerza de taladrado empuja el material sin mecanizar hacia el exterior provocándose una flexión que tiende a separar las distin-

tas capas del compuesto. El progresivo empuje de la herramienta provoca la aparición de grietas en el contorno del agujero y su propagación da lugar al desprendimiento de parte del material.

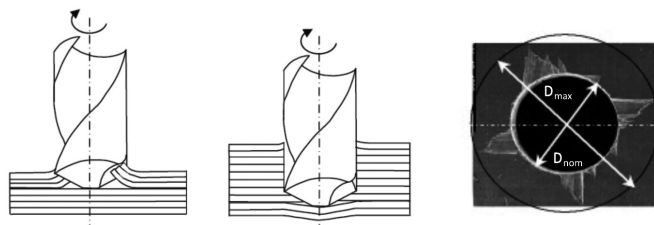


Fig. 1: Efecto de la delaminación a la entrada y salida del agujero [2]

En bibliografía pueden encontrarse diferentes metodologías para cuantificar el nivel de delaminación, pero habitualmente se emplean parámetros derivados del análisis de imágenes obtenidas con microscopía óptica. El más empleado en producción es el cociente entre el diámetro máximo de la zona de delaminación y el diámetro nominal del agujero (indicados como D_{max} y D_{nom} respectivamente en la Fig. 1):

$$Fd = D_{max} / D_{nom} \quad (1)$$

Para cuantificar la delaminación producida en el interior de la pieza puede resultar útil el empleo de técnicas no destructivas como la inspección por ultrasonidos mediante C-Scan o la tomografía por rayos X [3]. El grado de delaminación alcanzado se ve afectado por la selección de la velocidad de avance y la velocidad de corte. En este sentido, varios estudios han observado cómo el aumento de la velocidad de avance de la broca conlleva un incremento de la delaminación independientemente de la velocidad de corte seleccionada [1]. A modo de ejemplo, en la Fig. 2 se muestra la delaminación a la salida de un agujero realizado sobre GFRP con diferentes velocidades de avance. Esta tendencia se atribuye a la relación directa entre la velocidad de avance y la fuerza de axial. Por lo que se refiere a la velocidad de corte, no existe unanimidad respecto a su relación con el grado de delaminación provocado por lo que su efecto deberá analizarse para cada aplicación.

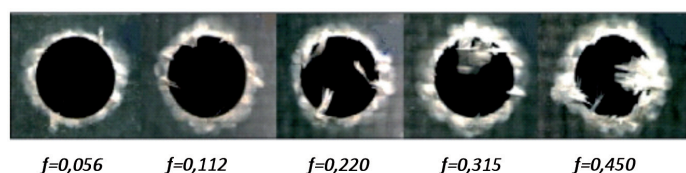


Fig. 2: Efecto del incremento de la velocidad de avance en la delaminación a la salida de la herramienta [4] (datos en mm/rev)

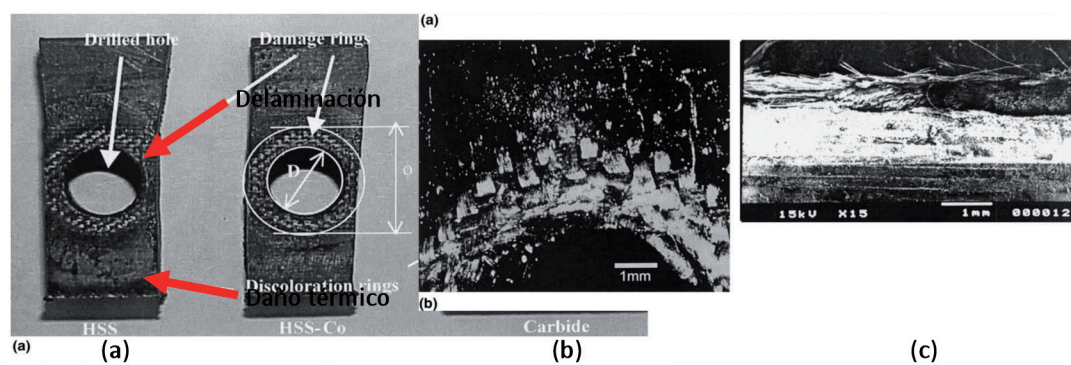


Fig. 3: Daños en la intercara de un apilado compuesto-titanio [7]

2.2. DAÑOS EN EL TALADRADO DE STACKS COMPUESTO-TITANIO

En el taladrado de *stacks* se han de considerar los posibles daños que pueden producirse en tres regiones: el material compuesto, la intercara entre los dos materiales y la lámina de titanio. La delaminación es uno de los mayores problemas en el taladrado del compuesto siendo el motivo del rechazo de en torno al 60% de las piezas en la industria aeronáutica [5]. Sin embargo, en el *stack* la posibilidad de que se produzca delaminación a la salida del compuesto se ve reducida por la resistencia adicional que ofrece la lámina de titanio. De hecho, si el espesor del titanio supera un valor crítico dicho efecto desaparece por completo [6].

Por otra parte, también se ha de prestar especial atención a las inestabilidades que puedan surgir en la intercara entre los dos materiales. El hecho de que los mecanismos de corte sean diferentes en ambos materiales provoca la aparición de fuertes vibraciones en la herramienta dando lugar a delaminaciones internas del compuesto. Así mismo, numerosos trabajos de investigación destacan también la relevancia de la dificultad de evacuar el calor y las virutas generadas en el proceso. Se ha de tener en cuenta que la acumulación de calor en el compuesto puede provocar la degradación de la matriz polimérica.

En la Fig. 3 se presenta el aspecto de una lámina de compuesto que ha sufrido daños severos en la zona de la intercara. En la Fig.3a puede observarse una zona de diferente coloración que se corresponde con la región dañada térmicamente. A la derecha, se puede ver una imagen superior y una sección transversal de la zona más próxima al centro del agujero que ha sufrido delaminación.

Los daños más severos se producen frecuentemente en el taladrado de la lámina de titanio y tienen su origen en las elevadas temperaturas alcanzadas entre el filo de corte y el material. Entre los distintos problemas que pueden aparecer en la superficie interna del agujero se encuentran la aparición de grietas, marcas de avance, restos de virutas adheridas, etc. Sin embargo, el problema clave es la generación de rebaba a la salida de la herramienta ya que su eliminación es imprescindible para el posterior ensamblaje de la pieza y, además, el desbarbado suele requerir el desmontaje del apilado.

3. EL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

El deterioro de la broca es una de las causas de la aparición de daños en el material y, por ello, es imprescindible conocer cómo se produce. En el caso del compuesto, el corte intermitente de las fibras, su elevada dureza y la baja conductividad térmica del material determinan en gran medida los mecanismos de desgaste de la herramienta. Así, los más relevantes son el desgaste abrasivo de las caras de incidencia y desprendimiento, el astillado del filo y la adhesión.

El desgaste mecánico provocado por fricción de las fibras con la herramienta es el más importante de los tres. En la Fig. 4a se muestra el estado de una broca de acero rápido que ha sufrido una abrasión severa durante el taladrado de GFRP. En dicha imagen pueden distinguirse los surcos característicos de

este tipo de desgaste. La abrasión también es la responsable de la desaparición del recubrimiento de la herramienta en la zona próxima al filo.

Este efecto puede observarse en el trabajo de Iliescu et al. [8] en el que se emplean brocas de recubiertas de diamante para taladrar fibra de carbono (Fig. 4b). En cuanto a la influencia de los parámetros de mecanizado, es evidente que el aumento de las velocidades de corte o avance favorece el desgaste abrasivo al incrementarse la velocidad relativa entre las fibras y la superficie de la herramienta.

En el taladrado de stacks compuesto-titanio, no es sencillo analizar por separado la influencia de cada material ya que los mecanismos de desgaste se encuentran interrelacionados en ambas fases. Además, los patrones de desgaste varían dependiendo del material de la herramienta por lo que es necesario analizarlos en cada caso concreto. Por ejemplo, Park et al. [10] comparan el desgaste de brocas de metal duro y diamante prolicristalino (PCD) en el taladrado de stacks CFRP/Ti. En la herramienta de metal duro destaca la adhesión de titanio mientras que la de PCD presenta una mayor tendencia al astillamiento (debido a su menor tenacidad) (Fig. 5b). Además, en ambos casos puede distinguirse el efecto de la abrasión en el redondeamiento de los filos y en el desgaste de flanco. Isbilar y Ghassemieh por su parte [11], estudian el desgaste de brocas recubiertas con TiAlN y concluyen que el origen del fallo de la herramienta se encuentra en el micro-astillado de ésta (ver Fig5c). En el trabajo presentado recientemente por Xu et al. [5] puede encontrarse una revisión más extensa de las investigaciones realizadas en esta línea en las últimas décadas.

4. PRÁCTICAS RECOMENDADAS PARA CONSEGUIR UN TALADRADO DE ALTA CALIDAD

4.1. TALADRADO DE MATERIALES COMPUESTOS

Una de las ideas clave para conseguir agujeros de calidad en materiales compuestos es que la fuerza axial durante el taladrado debe ser controlada ya que la delaminación comienza a producirse en el momento en el que dicha fuerza supera un valor límite

[12]. Las estrategias que se presentan a continuación persiguen dos objetivos: modificar dicho límite o reducir la intensidad de la fuerza axial.

a) Control de los parámetros de mecanizado

Varios trabajos de investigación coinciden en el que el parámetro que determina el valor de la fuerza axial es la velocidad de avance mientras que la velocidad de giro de la herramienta apenas tiene influencia [1]. En el trabajo de Khashaba et al. [13] puede verse que el aumento de la velocidad de corte posee un efecto despreciable si la herramienta es nueva. Sin embargo, a medida que el desgaste aumenta, la influencia de la velocidad de corte es cada vez mayor (ver Fig. 6).

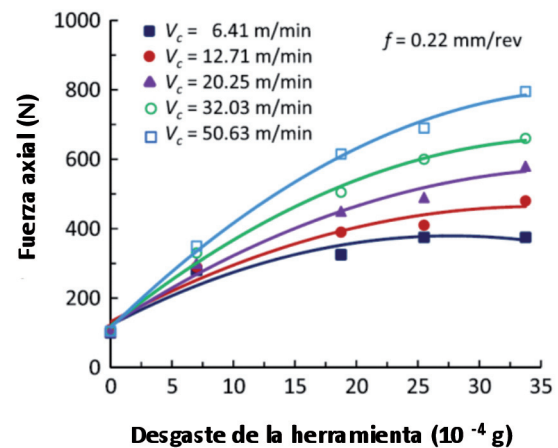


Fig. 6: Efecto del desgaste de la herramienta en la fuerza axial para diferentes velocidades. [13]

La reducción de la velocidad de avance en la entrada y la salida de la broca es una práctica muy extendida para controlar la fuerza axial y evitar la delaminación. De cara a seleccionar las velocidades de avance, puede ser útil recurrir a modelos analíticos que permitan estimar la fuerza axial crítica en cada etapa del proceso ya que ésta dependerá de otros factores como, por ejemplo, el espesor del material sin mecanizar [4,14].

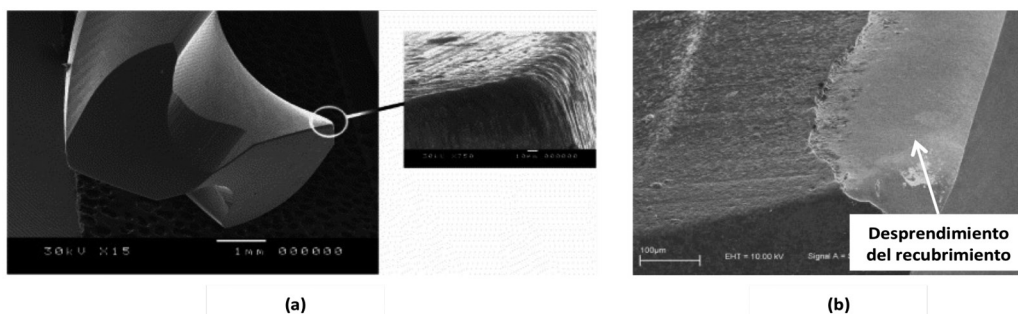


Fig. 4: Efecto de la abrasión en una broca de acero rápido (a) y en una broca recubierta de diamante (b) [8,9]

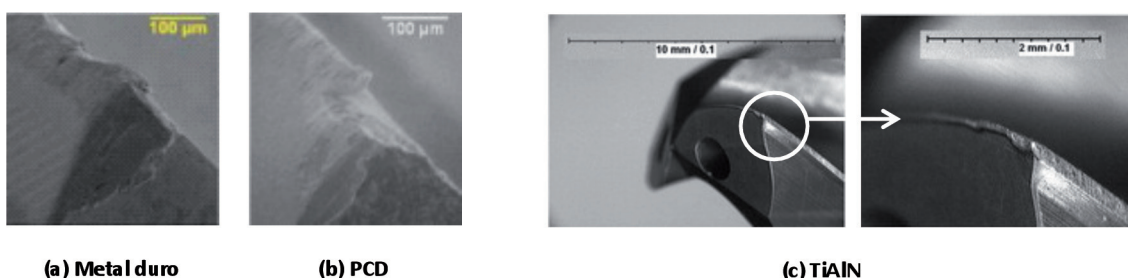


Fig. 5: Desgaste de herramientas en el taladrado de stacks CFRP/Ti [10,11]

b) Empleo de brocas adaptadas al mecanizado de compuestos

El control de la velocidad de avance puede ser suficiente si se mecanizan agujeros de diámetro pequeño, pero a medida éste aumenta la geometría de la herramienta es determinante [14]. En este sentido, se ha observado que el incremento de ángulo de punta de la broca redonda en un aumento de la fuerza axial y es habitual encontrar herramientas comerciales con ángulos de punta en torno a los 90°. Además, la optimización de geometría de los filos de la herramienta también es especialmente relevante ya que la fuerza axial se reduce si se evita que ésta se concentre en la zona más próxima al centro de la broca. La Fig. 7 muestra las geometrías de herramienta más habituales en el taladrado de compuestos. Entre éstas, la (b) y (d) son las producen una delaminación menor, siendo la (b) la más óptima en el taladrado de placas de pequeño espesor [2].

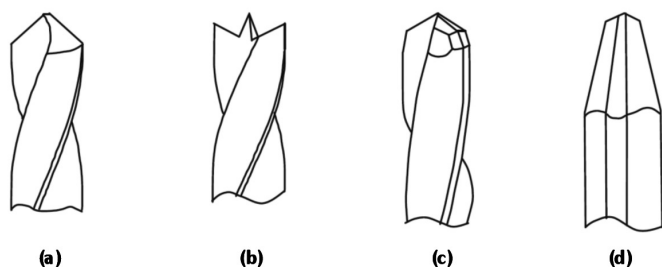


Fig. 7: Diferentes diseños de broca para el taladrado de materiales compuestos [2]

El material de la herramienta también es importante de cara a minimizar su desgaste y la fuerza axial. Las brocas de acero rápido no son adecuadas ya que presentan un desgaste por abrasión severo tras unos pocos agujeros. Resulta más adecuado emplear herramientas de metal duro con recubrimientos de diamante. Otra opción comercial muy habitual son las herramientas con inclusiones de PCD que son sinterizadas junto con el metal duro.

4.2. TALADRADO DE STACKS COMPUESTO-TITANIO

a) Parámetros de mecanizado

En el taladrado de stacks compuesto-titanio, la velocidad de avance es el parámetro que posee una mayor influencia en la fuerza axial y en la calidad del agujero. En este sentido, se ha observado que el empleo de avances elevados (0.05-0.1 rev/min) y velocidades de corte bajas (10-30 m/min) redunda en una mejora de la calidad del agujero en el titanio. Sin embargo, dichas condiciones resultan letales para la lámina de compuesto ya que la elevada fuerza axial aumenta el daño por delaminación. Para mecanizar dicho material, resulta mucho más ventajoso emplear velocidades de avance más bajas (0.01-0.05 rev/min) junto con velocidades de corte superiores (150-200 m/min). Partiendo de que los problemas ocasionados en el titanio son los más difíciles de evitar, la adopción de una solución de compromiso con velocidades de avance moderadas (en torno a 0.05 rev/min) y velocidades de corte bajas puede permitir obtener agujeros de calidad en los dos materiales.

b) La herramienta de corte

La selección de una broca para el taladrado de stacks es una tarea compleja ya que los mecanismos de desgaste en el corte de cada material son muy diferentes. En el compuesto, predomina la abrasión y el redondeo de los filos, mientras que en el titanio la elevada temperatura en el contacto favorece la adhesión de las virutas y el astillado del filo. Para mecanizar con éxito ambos materiales es necesario disponer de una herramienta de alta dureza y

tenacidad, de elevada conductividad térmica y con un comportamiento químico lo más inerte posible.

Hasta el momento, se ha estudiado la posibilidad de emplear herramientas de metal duro (con y sin recubrimiento) así como herramientas de PCD tipo "vein". En los trabajos de Jawahir [15] y Sousia et al. [16] se observa como los recubrimientos de TiN, Al_2O_3 y Ti[C,N] proporcionan resultados deficientes ya que su baja conductividad térmica es una barrera para la evacuación del calor generado en el corte. Fujiwara et al. [17] determinan que es más apropiado emplear recubrimientos tipo TiAlCr/TiSi que TiAlN o Ti-SiN. No obstante, los mejores resultados se obtienen empleando herramientas de PCD o recubiertas con diamante y, a día de hoy, es frecuente encontrar éstas en la oferta de los fabricantes.

El rendimiento de la herramienta depende también de su geometría. En este sentido, se ha observado que las brocas con un mayor ángulo de hélice permiten evacuar mejor la viruta y el calor generado dando lugar a fuerzas de corte y temperaturas más bajas. El efecto del ángulo de punta es analizado por SenthilKumar et al. [19] y concluyen que las herramientas con un mayor ángulo (130°) presentan un mejor rendimiento que aquellas con uno menor (118°). Por otra parte, la precisión del agujero mejorará si se emplean brocas con geometría escalonada ya que éstas poseen un efecto auto-centrante. El modelo Corodril 452.4 de Sandvik-Coromant® es un ejemplo de este tipo de herramienta (ver Fig 8).



Fig. 8: Soluciones de Sandvik-Coromant® para el taladrado manual de stacks CFRP-Ti (a y b) y para el taladrado con avance automático (c)

c) Las condiciones de refrigeración

La introducción de fluido de corte presenta numerosas ventajas tanto en el taladrado de la lámina de compuesto como en la de titanio: reducción del coeficiente de fricción, evacuación del calor y de la viruta, reducción de la adhesión etc. Dichos beneficios dependen en gran medida de la cantidad de refrigerante que alcanza la zona de corte por lo que el empleo de brocas con refrigeración interna es muy positivo de cara a mejorar el proceso. En este sentido, Brinksmeier et al. [Bri02] han observado que la implementación de la técnica de mínima cantidad de lubricante (MQL) a través de los canales internos de la broca puede ser una alternativa viable en el taladrado de apilados.

5. TÉCNICAS DE TALADRADO AVANZADAS

5.1. TALADRADO ORBITAL

El taladrado orbital es una alternativa con creciente aplicación en componentes de fuselaje formados por stacks de compuesto-titanio y compuesto-aluminio. En este proceso, el taladrado se realiza implementando un movimiento circular al eje de la herramienta además del avance axial. La superposición de estos movimientos simultáneos genera una trayectoria helicoidal, y su peculiaridad radica en que los agujeros se realizan con fresa en lugar de con broca como en un taladro convencional (Fig. 9).

La principal ventaja del taladrado orbital es su alta flexibilidad para realizar agujeros de diferentes tamaños utilizando para ello

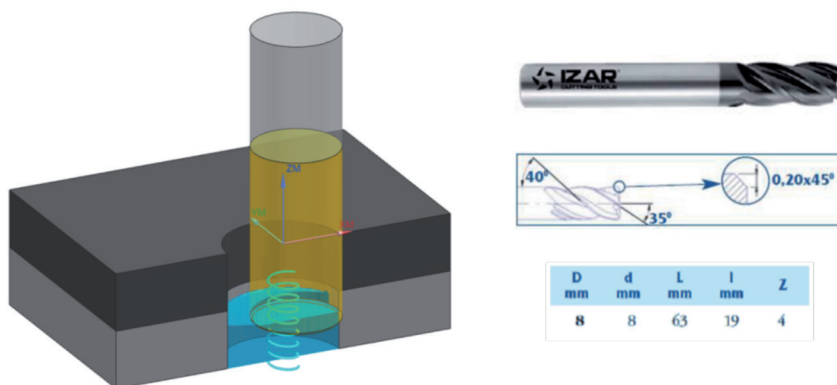


Fig. 9: Representación de taladrado orbital y fresa frontal de 4 labios con hélice variable de IZAR

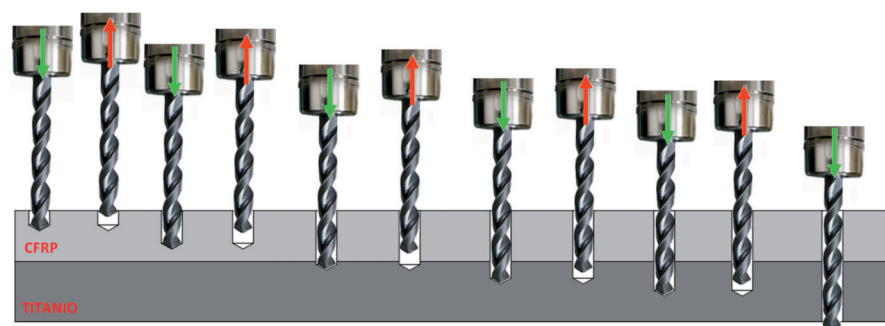


Fig. 10: Taladrado de un apilado CFRP/Titanio con una secuencia de "Peck drilling"

la misma herramienta. Además, la extracción de la viruta es más efectiva y la temperatura se reduce debido a la mejor refrigeración de la herramienta. Estas dos últimas características son especialmente críticas en taladrado convencional donde la punta de la broca y sus filos se encuentran confinados en el agujero que está siendo taladrado.

El mecanizado orbital también tiene desventajas como, por ejemplo, un mayor tiempo de operación con respecto al taladrado convencional para un agujero de las mismas dimensiones, o problemas de flexión de herramienta que pueden llevar a defectos de diámetro que hacen necesario compensar las trayectorias para cumplir los criterios de calidad de los agujeros. A pesar de esto, este proceso ha demostrado tanto su alta productividad como el descenso de costes de fabricación.

Como se ha comentado previamente, las condiciones de mecanizado para uno de los materiales del stack no son adecuadas para el otro. Por ello, es necesario emplear unas condiciones de compromiso que satisfagan el mecanizado de ambos materiales evitando la variación de condiciones mientras la herramienta está procesando el material. En general, las velocidades de corte óptimas son mayores en el material compuesto que en el titanio, al igual que sucede con los avances axiales, siendo unos valores de referencia típicos de 180 m/min y 110 mm/min respectivamente para el compuesto, y de 80 m/min y 25 mm/min para el titanio. En cambio, el paso de la hélice orbital o avance por revolución para el caso del caso del compuesto es menor que para el caso del titanio. En el aluminio, todos los parámetros de mecanizado se ven incrementados con respecto al compuesto y titanio. Otros criterios de calidad para estas operaciones aconsejan que el sentido de la hélice sea en la misma dirección que el giro de la herramienta, y también taladrar en el sentido compuesto/titanio para reducir los niveles de delaminación y rebaba a la salida de la herramienta.

Debido a la creciente demanda de materiales compuestos para su utilización en la estructura de aeronaves, han surgido nuevas

soluciones comerciales como alternativa a las tradicionales basadas en grandes máquinas *gantry* o robots antropomórficos. En este sentido, la empresa Novator en colaboración con Sandvik Coromant ha desarrollado un sistema portátil de taladrado orbital. Este tipo de soluciones ya se emplean para taladrar algunas partes del fuselaje de alta sollicitación y difícil acceso en operaciones de ensamblaje como, por ejemplo, en la unión del fuselaje y la caja central del ala del Boeing 787 Dreamliner.

5.2. PECK DRILLING

Cuando la configuración del ensamblaje de la aeronave lo permite, el emplear estrategia de taladrado en la que la lámina de compuesto apoya sobre la parte metálica limita el riesgo de delaminación causada por el esfuerzo axial. Sin embargo, esta opción requiere una evacuación eficaz de las virutas metálicas calientes generadas durante el corte ya que las virutas atascadas en las acanaladuras de la herramienta pueden provocar daños de la superficie del material compuesto. En el caso de los stacks CFRP/metal, esas virutas largas dañan al CFRP y conducen a un diámetro de agujero

más grande en el CFRP que en el metal (20 a 50 μ m de diferencia). Además, las virutas largas impiden al refrigerante hacer su labor, permitiendo así que el calor se acumule en el agujero y cause un desgaste excesivo de la herramienta. En última instancia, este fenómeno puede conducir a un fallo catastrófico de la herramienta.

Una posible solución para controlar el tamaño y la forma de las virutas es el uso de ciclos de mecanizado especiales. La mayoría de los controles de las máquinas herramientas ofrecen ciclos de "Peck drilling" en los que el taladrado se produce de forma interrumpida en etapas. Así, una vez que la broca ha penetrado una valor determinado ("picotazo") ésta se retira una pequeña distancia que permite romper la viruta y, a continuación, sigue penetrando (ver Fig.10). Este tipo de ciclos permiten romper las virutas de manera que sean lo suficientemente pequeñas para fluir hacia arriba a través de las estrías de la herramienta sin causar daño a la superficie o sin un desgaste prematuro de la herramienta. La desventaja de los ciclos de "Peck drilling" es que necesitan más tiempo para realizar cada agujero. En grandes series de producción, estas deficiencias pueden ser un problema grave.

5.3. TALADRADO ASISTIDO POR VIBRACIONES

Otra posible solución para evitar la generación de virutas excesivamente largas consiste en superponer al avance continuo de la broca un movimiento axial alternativo. Para generar dicho movimiento vibratorio, o bien se reduce la rigidez axial del sistema de mecanizado (excitación libre) o bien se impone un movimiento a la herramienta (excitación forzada).

En el primer caso, la menor rigidez axial del sistema mecánico conllevará que éste sea más sensible al chatter generado por el mecanizado. Como consecuencia, las micro-vibraciones generadas serán amplificadas y mantenidas (es un taladrado con vibraciones autosostenibles). Cabe señalar que esta técnica es difícil de incorporar industrialmente en un sistema de mecanizado de una manera robusta. En el caso de imponer una excitación forzada, el

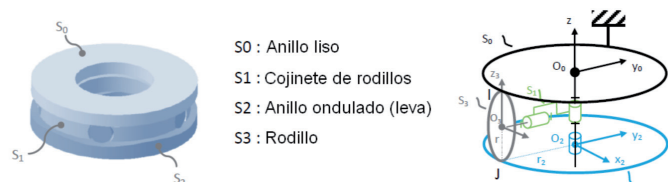


Fig. 11: Sistema vibratorio MITIS (Concept SINEHOLING®) [20]

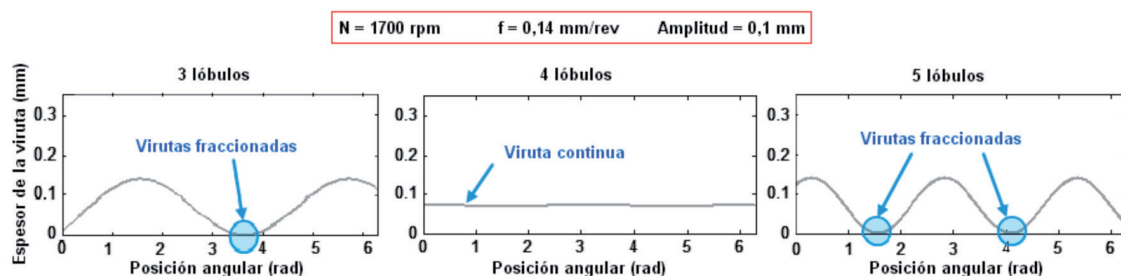


Fig. 12: Evolución del espesor de viruta para una broca de dos dientes en función del número de lóbulos de la leva del sistema MITIS. [20]

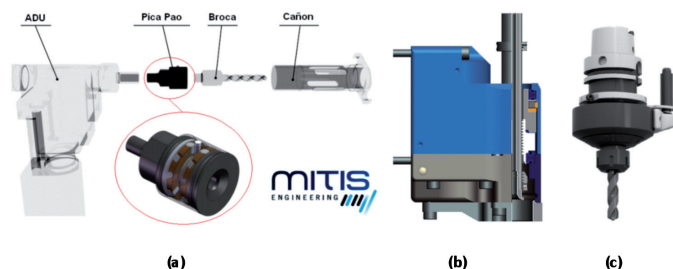


Fig. 13: El sistema MITIS (a) montado en un ADU, (b) integrado en el ADU y (c) integrado en el porta-herramienta para máquina CNC

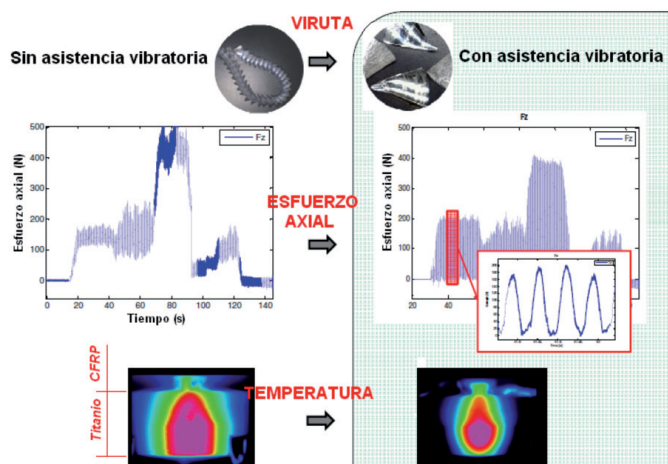


Fig. 14: Efecto de la asistencia vibratoria MITIS en la geometría de la viruta, el esfuerzo axial y la temperatura durante el taladrado de un apilado CFRP/Titanio [20]

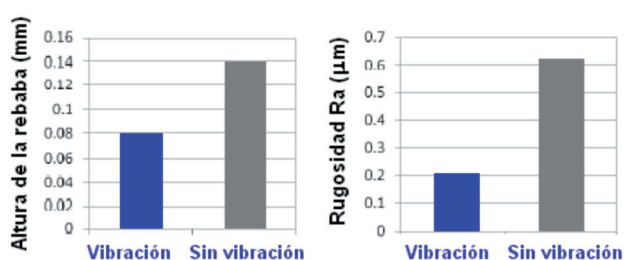


Fig. 15: Calidad del agujero realizado con una broca de diámetro 9.52 mm sin y con asistencia vibratoria MITIS [20]

movimiento vibratorio puede implementarse mediante diferentes tecnologías. Entre los más comunes están los sistemas piezoeléctricos, electromagnéticos, hidráulicos, de engranaje no circular, de leva, etc. La elección de una técnica u otra depende de la importancia de la frecuencia de excitación y la amplitud deseada.

Uno de los sistemas más novedosos es el propuesto por MITIS. En este caso, el sistema vibratorio consiste en un cojinete de rodillos (S1) entre dos anillos (S_0 y S_2). Este sistema puede ser similar

a un cojinete axial de los cuales uno de los dos anillos es ondulado (S_2) y actúa como una leva (ver Fig. 11). Este último gira mientras que el anillo liso permanece fijo (S_0). Además, un conjunto de arandelas de resorte (no mostrado en la figura) mantiene el contacto entre

el rodillo y la leva. Así, las variaciones en la altura del anillo ondulado inducen un movimiento de traslación axial alterno que se superpone al movimiento de avance de la herramienta y fragmenta la viruta.

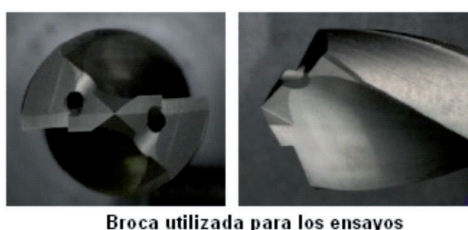
La condición para obtener una variación del espesor y una fragmentación de la viruta es tener un desfase entre dos pasadas de los filos de corte. Para ello, es necesario adecuar el número de lóbulos del anillo ondulado al número de dientes o aristas de la broca (o viceversa). Así, por ejemplo, si se emplea una broca con un número par de aristas de corte, la variación en el espesor de la viruta únicamente se producirá si se dispone un número impar de lóbulos (ver Fig.12).

Una de las ventajas del sistema MITIS es que se puede integrar tanto en los sistemas de taladrado semi-automáticos (ADU o Automatic Drilling Unit) neumáticos como eléctricos, así como en los centros de mecanizado CNC.

La aplicabilidad de esta variante del proceso de taladrado es analizada en profundidad por Jallagas [20]. El autor observa que las fuerzas de corte son inferiores a las obtenidas sin asistencia vibratoria y que el empleo del taladrado asistido por vibraciones permite también reducir la cantidad de calor generada en el corte. Este efecto, puede observarse en la Fig. 14 en la que se muestran las imágenes termográficas de una pieza de apilado compuesto-titanio taladrada sin y con asistencia vibratoria. Además, el autor también observa como un aumento de la amplitud de los lóbulos redonda en una disminución mayor de la temperatura. La disminución también es significativa cuando el número de lóbulos aumenta.

Se ha de tener en cuenta que la reducción de la temperatura presenta importantes ventajas tanto en el taladrado de la lámina de compuesto como en el titanio. En el caso del compuesto ayuda a prevenir la degradación de la matriz polimérica.

Para la parte metálica, se traduce en una menor generación de rebaba y un aumento de la calidad del agujero a la salida de la herramienta. Ade-



Broca utilizada para los ensayos

más, la asistencia vibratoria también permite mejorar la calidad superficial (rugosidad) del agujero. A modo de ejemplo, en la Fig. 15 se muestran los resultados obtenidos en [20] para una misma operación de taladrado de apilado-compuesto titanio con y sin el empleo del sistema MITIS. En este caso, se observó una reducción de la altura de la rebaba de entorno al 40% y una reducción de la rugosidad del agujero de más del 60%.

6. CONCLUSIONES

El taladrado de materiales compuestos y *stacks* compuesto-titanio presenta notables diferencias en comparación con el mecanizado de metales. A continuación se resumen las ideas clave presentadas en este trabajo:

- En el taladrado de materiales compuestos, el defecto que posee una mayor influencia en la calidad del agujero es la delaminación. Éste defecto está relacionado con la fuerza axial generada durante el proceso y puede ser controlado mediante la correcta selección de los parámetros de mecanizado o el empleo de brocas con una geometría adaptada.
- Entre los parámetros de mecanizado, la velocidad de avance es el que posee una mayor influencia en la fuerza axial. El incremento de la velocidad de avance conllevará un aumento proporcional de la fuerza axial y del nivel de delaminación. La influencia de la velocidad de corte es menor, pero es más importante a medida que aumenta el desgaste de la herramienta.
- La abrasión provocada por la elevada dureza de las fibras del compuesto es el principal mecanismo de desgaste de las brocas. El empleo de herramientas de metal duro recubiertas o de PCD permitirá alargar la vida de éstas.
- En el taladrado de *stacks* compuesto-titanio, se ha de prestar especial atención a los problemas que pueden surgir en la intercara entre los dos materiales. La inestabilidad del corte en esta zona y la dificultad para evacuar las virutas de titanio pueden conducir a una delaminación interna del compuesto. Además, las elevadas temperaturas pueden dar lugar a la degradación de la matriz polimérica. En la lámina de titanio, la rebaba generada a la salida de la herramienta es el defecto más relevante.
- Los problemas generados en la lámina de titanio son los más difíciles de evitar. El empleo de condiciones de mecanizado con velocidades de avance moderadas (en torno a 0,05 rev/min) y velocidades de corte bajas puede permitir obtener agujeros de calidad en ambos materiales.
- El taladrado de *stacks* puede facilitarse mediante el empleo del taladrado orbital, el *peck drilling* o el taladrado asistido por vibraciones. El taladrado orbital es un proceso flexible que permite realizar agujeros de diferente tamaño empleando la misma herramienta (fresa). Sus principales ventajas son el aumento de la refrigeración de la herramienta y la efectividad en la extracción de la viruta. En el *peck drilling*, el taladrado se produce en ciclos consecutivos de penetración y retirada de la broca. La interrupción del taladrado permite generar virutas pequeñas cuya evacuación es más sencilla. El taladrado asistido por vibraciones también persigue este mismo objetivo. Sin embargo, en este caso la rotura de la viruta no se produce por la interrupción del proceso de corte sino por la reducción del espesor de la viruta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Liu D., Tang Y., Cong W. L. "A review of mechanical drilling for composite laminates". *Composite Structures*. Vol. 94-4 p. 1265-1279. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.024>).
- [2] Ahmad J. *Machining of polymer composites*. Springer, 2009. 315p. ISBN:978-0-387-35539-9.
- [3] Durão L., Tavares J., de Albuquerque V. et al. "Drilling Damage in Composite Material". *Materials*. Vol. 7-5 p. 3802-3819. (DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma7053802>).
- [4] Khashaba U., El-Sonbaty I., Selmy I. et al. "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I – Effect of machining parameters". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol. 41-3 p.391-400. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.011>).
- [5] Xu J., Mkaddem A., El Mansori M. "Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composites: A state-of-the-art review". *Composite Structures*. Vol. 135 p.316-338. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>).
- [6] Qi Z., Zhang K., Li Y., Liu S. et al. "Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks". *Composite Structures*. Vol. 107 p. 604-609. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.036>).
- [7] Ramulu M., Branson T., Kim D. "A study on the drilling of composite and titanium stacks". *Composite Structures*. Vol. 54-1 p. 67-77. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00071-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00071-X)).
- [8] Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M. E., et al. "Modeling and tool wear in drilling of CFRP". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 50-2 p.204-213. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.004>).
- [9] Abrão M., Rubio J. C. C., Faria P. et al. "The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fiber reinforced plastic composite". *Materials & Design*. Vol. 29-2 p.508-513. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.016>).
- [10] Park K. H., Beal A., Kim D. et al. "Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools". *Wear*. Vol.271-11 p. 2826-2835. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.038>).
- [11] Isbilir O., Ghassemieh E. "Comparative study of tool life and hole quality in drilling of CFRP/titanium stack using coated carbide drill". *Machining Science and Technology*. Vol. 17-3 P.380-409. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2013.806098>).
- [12] Hocheng H., Tsao C. C. "The path towards delamination-free drilling of composite materials". *Journal of Material Processing Technology*. Vol.167 p.251-264. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.039>).
- [13] Khashaba U.A., El-Sonbaty I.A., Selmy A. I. et al. "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear". *Composites: Part A*. Vol.41 p.1130-1137. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.011>).
- [14] Won M.S., Dharan C.K.H. "Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates". *Journal of Manufacturing Science and Technology*. Vol. 124 p.242-247. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1448317>).
- [15] Jawahir I.S., van Luttervelt C.A. "Recent developments in chip control research and applications". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 42-2 p.659-693. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62531-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62531-1)).
- [16] Ben Soussia A., Mkaddem A., El Mansori M. "Effect of coating type on dry cutting of glass/epoxy composite". *Surface and Coatings Technology*. Vol.215 p.413-420. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.098>).
- [17] Fujiwara J., Nagaura R., Tashiro T. "Drilling of CFRP/Ti6Al4V stack board". *Int. J. Autom. Technol*. Vol.7 p.426-432. (DOI: <http://dx.doi.org/10.20965/ijat.2013.p0426>).
- [19] SenthilKumar M., Prabukarthi A., Krishnaraj V. "Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks". *Procedia Engineering*. Vol. 64 p.582-592. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.133>).
- [20] Jallegas Jeremy, "Optimisation du perçage de multi-matériaux sur unité de perçage automatique (UPA)". Tesis doctoral. Université Sciences et Technologies – Bord