



ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PROCESO DE TALADRADO DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA DE CARBONO PARA DIFERENTES GEOMETRÍAS DE BROCA

NORBERTO FEITO SÁNCHEZ¹, JORGE LÓPEZ PUENTE², ANA MUÑOZ SÁNCHEZ¹, MARÍA HENAR MIGUÉLEZ¹

¹Universidad Carlos III de Madrid
Departamento de Ingeniería Mecánica
Av. Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, España

²Universidad Carlos III de Madrid
Departamento de Ingeniería Mecánica de medios continuos y Teoría de estructuras
Av. Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, España

(Recibido 15 de marzo de 2018, para publicación 15 de julio de 2018)

Resumen – Durante los últimos años, el uso de materiales compuestos poliméricos reforzados con fibra ha experimentado un alza considerable en la industria, especialmente en el ámbito aeronáutico. Esto se debe, principalmente, a la excelente relación resistencia-peso, que lo sitúa como unos materiales idóneos capaz de reemplazar a materiales tradicionales como el acero. Una de las operaciones más comunes que se realiza sobre estos materiales es el taladrado de agujeros, especialmente en la producción de grandes estructuras donde la unión de piezas mediante tornillos es inevitable. El presente trabajo se centra en estudiar esta operación, analizando la influencia de la broca tanto en la fuerza de corte como en el daño generado durante el taladrado. Dos geometrías distintas (una convencional y otra escalonada) se han ensayado sobre material polimérico reforzado con fibra de carbono (CFRPs por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron la mejora de la calidad de los agujeros en el caso de usar una broca escalonada, pero solo trabajando a bajas velocidades de avance. Con la intención de realizar un estudio paramétrico más profundo, se ha desarrollado un modelo numérico tridimensional. Mediante resultados experimentales, el modelo ha sido validado y utilizado para estudiar la influencia de diversos factores que afectan a la calidad del taladro, como pueden ser el soporte de apoyo del laminado o el espesor del mismo.

Palabras clave – Taladrado, CFRP, material compuesto, delaminación, elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

Los polímeros reforzados con fibras Largas (LFRPs por sus siglas en inglés), son materiales ampliamente utilizados en la industria aeroespacial, especialmente los reforzados con fibras de carbono (CFRP por sus siglas en inglés) debido a sus excelentes propiedades mecánicas y físicas y su bajo peso [1].

Actualmente, la producción de grandes estructuras de material compuesto conlleva la unión de diferentes partes que son fabricadas por separado y unidas mediante tornillos o pernos. Pese a que existen intentos de implementar nuevos procesos para la realización de los agujeros como el corte por láser o chorro de agua, la operación de taladrado convencional sigue siendo la más común en el sector [2,3]. Sin embargo, existen dos grandes inconvenientes: uno relacionado con el carácter abrasivo de sus fibras que producen un desgaste rápido de la herramienta y otro sobre la naturaleza misma del material que es susceptible al daño generado por la operación de taladrado. Como consecuencia, los materiales CFRP se han clasificado como materiales difíciles de mecanizar. Se ha comprobado que el daño del material afecta a la vida en servicio del componente [4,5], por lo que el diseño de nuevas herramientas que tengan un mejor comportamiento sin conllevar altos costes supone un reto actual para la industria.

Los defectos inducidos durante el taladrado han sido analizados por los autores en un trabajo previo [6]. Este estudio, en concordancia con otros trabajos de investigación [7,8], resalta la delaminación como el daño más importante que se observa en el material. Se ha comprobado que la delaminación generalmente aumenta con el avance incluso a alta velocidad [9-11], y se ve agravada con el progreso del desgaste de la herramienta [12]. Tanto el avance de la herramienta a través del material, como la modificación de la

geometría debido al efecto abrasivo de las fibras, son factores que aumentan la fuerza de avance disminuyendo la calidad del agujero.

La geometría de la broca es otro de los factores clave que influye en la calidad del agujero. Por ejemplo, para brocas helicoidales, la delaminación aumenta con el ángulo de punta de la herramienta como se ha podido demostrar en diversos estudios [6,13]. Dentro de las geometrías diferentes a la helicoidal, las geometrías aserradas o con filos rectos mostraron mejores resultados induciendo menos daño en el material [14-16]. Otros autores también demostraron que las brocas de núcleo reducen el daño en el material debido a la ausencia de filo transversal [17,18]. Por último, las brocas escalonadas también mostraron una mejora en comparación a la broca convencional debido a la reducción de las fuerzas por la generación de un agujero piloto en el primer escalón de la broca [19-22].

Para mejorar el conocimiento sobre el proceso de taladrado, han surgido recientemente algunos modelos numéricos basados en el método de los elementos finitos, con la intención de predecir la delaminación a lo largo del espesor. Los modelos numéricos validados son una potente herramienta capaz de desacoplar los parámetros que influyen el proceso de taladrado.

Los modelos 3D de taladrado se pueden clasificar en dos tipos: los que asemejan la broca a un punzón y no incluyen la rotación de la broca, y los que reproducen el movimiento completo de la broca e incluyen la eliminación del material debido al corte de la herramienta. La primera aproximación se centra especialmente en estudiar la geometría de la broca de geometrías afiladas y diferentes ángulos de punta, debido a que son estas las que menos daño inducen en el material [23-25]. La segunda aproximación, analiza también los parámetros de corte y la extensión del daño inter-laminar [26-28].

La dificultad de los modelos “completos” (los que incluyen la rotación de la broca) radica en la simulación de la broca lo más realista posible, así como en la introducción de criterios de daño del material y eliminación de viruta. Debido a esto, estos modelos conllevan un alto coste computacional en comparación con los modelos “simplificados” (modelos semejantes al proceso de punzonado) pero mejorando la estimación de las fuerzas y la delaminación [29].

Este trabajo se centra por tanto, en la caracterización de una geometría de broca escalonada en comparación con una geometría convencional. Con la intención de mejorar el conocimiento sobre esta geometría, de coste accesible por la industria y con unas características que posibilitan la mejora de calidad del taladrado en materiales CFRP, se ha desarrollado un modelo numérico 3D el cual se ha utilizado para llevar a cabo un análisis paramétrico de diversos aspectos que influyen en el daño del material.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

En este apartado se describe el dispositivo utilizado para la realización de los ensayos, así como el material y las brocas seleccionadas.

2.1. Material

El material ensayado es un apilado de 10 láminas de polímero reforzado con fibras de carbono (CFRP) con un 55.29% de contenido en resina. Cada lámina se compone de una matriz epoxy-8552 reforzada con fibras de carbono AS-4 orientadas en dirección X e Y generando un tejido. La compañía Hexcel Composites fue la encargada de proporcionar el material ya fabricado. Las propiedades mecánicas de las probetas se muestran en la tabla 1. Las dimensiones de estas probetas son de 120 mm×29 mm y un espesor de 2.2 mm.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material.

| Propiedad | Valor | Propiedad | Valor |
|------------|------------------------|-----------|---------|
| ρ | 1570 Kg/m ³ | G_{12} | 5 GPa |
| $E_1=E_2$ | 68 GPa | $X_t=Y_t$ | 795 MPa |
| E_3 | 10 GPa | $X_c=Y_c$ | 860 MPa |
| ν_{12} | 0.22 | S_t | 98 MPa |

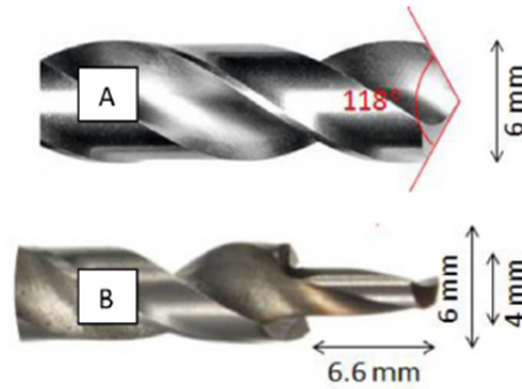


Fig. 1. Geometría de las brocas utilizadas en el estudio.

2.2. Brocas

En este estudio se comparan dos geometrías de broca: una con geometría convencional de forma helicoidal y otra con geometría escalonada. Ambas tienen un diámetro nominal de 6 mm y un ángulo de punta de 118°. La geometría escalonada presenta una primera sección de 4 mm de diámetro. Un esquema de ambas geometrías se presenta en la Fig. 1.

2.3. Equipo de ensayos

Los experimentos de taladrado se llevaron a cabo en un centro de mecanizado adaptado con un dinamómetro rotativo para medir la fuerza de avance y el par de la broca para cada ensayo. El montaje del equipo puede observarse en la Fig. 2. Los valores de los parámetros de corte se han seleccionado de acuerdo con el fabricante de herramientas (GUHRING) y se muestran en la tabla 2. Los experimentos se llevaron a cabo sin lubricante para evitar la contaminación de las muestras con el fluido.

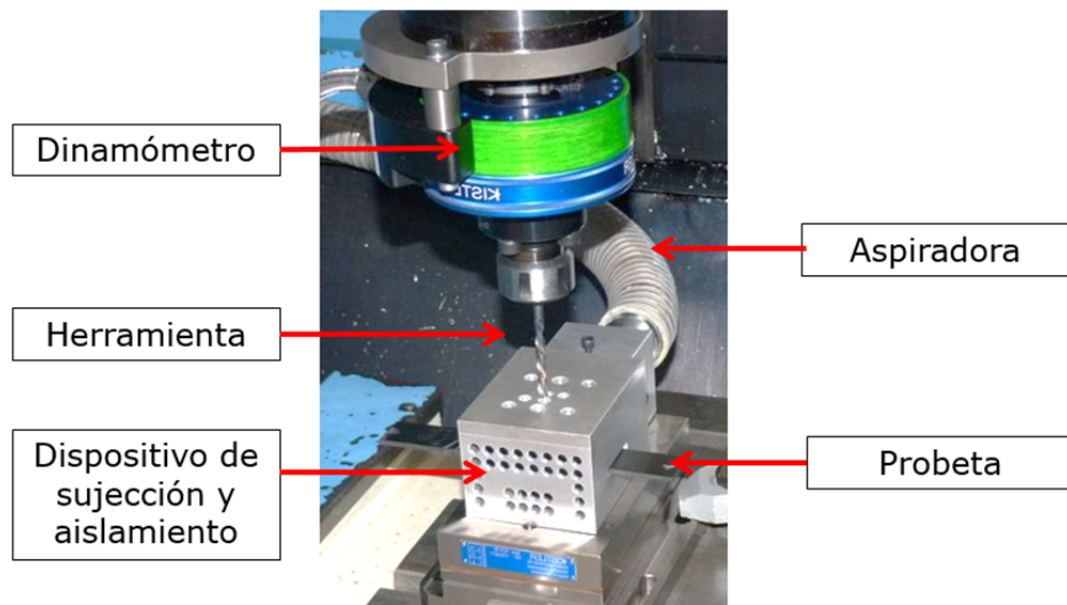
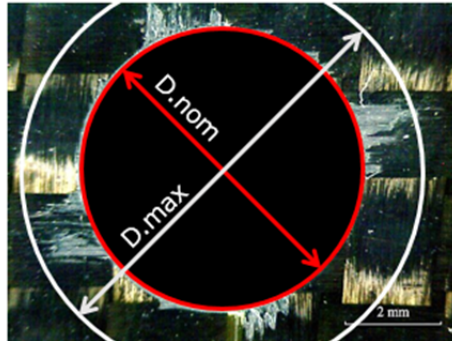


Fig. 2. Montaje del equipo utilizado en los ensayos.

Tabla 2. Parámetros de corte.

| Parámetro | Valor | | |
|------------------------------|-------|-----|------|
| Velocidad de avance (mm/rev) | 0.05 | 0.1 | 0.15 |
| Velocidad de corte (m/min) | 25 | 50 | 100 |



$$F_D = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$$

Fig. 3. Medida del factor de delaminación.

El daño infringido en el material se cuantificó mediante el factor de delaminación definido como la relación entre el máximo diámetro de la zona dañada y el diámetro nominal del agujero (6 mm) como se observa en la Fig. 3. Las medidas se realizaron mediante observación por microscopio (Optika SZR).

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Fig. 4 se ha representado la evolución de los valores máximos de la fuerza de avance de la broca, en función de la velocidad de avance. Se ha demostrado en estudios previos sobre la materia, que la fuerza de avance es un factor crítico en el daño que se genera durante el taladrado. Por ese motivo, es de gran interés que la fuerza de empuje sea la mínima posible durante el proceso. En este estudio, se observó que, en general, la fuerza de avance tiene una relación creciente con el avance para ambas geometrías.

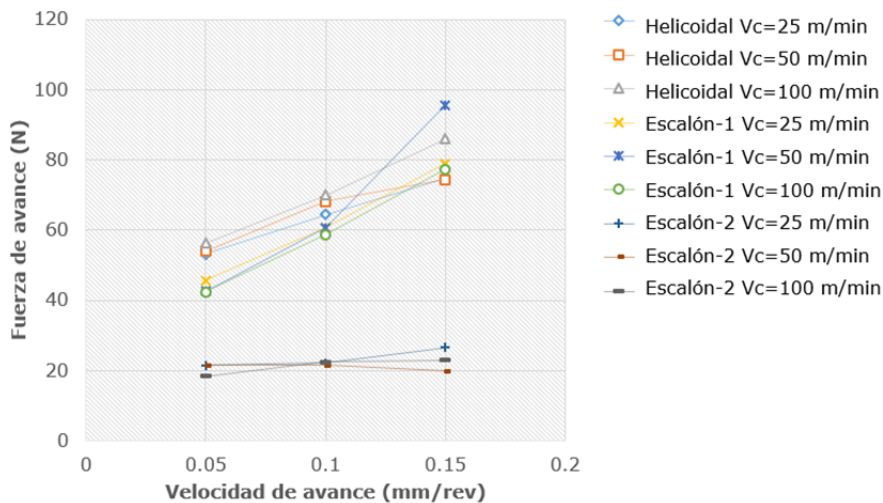


Fig. 4. Evolución de la fuerza de avance de la herramienta en función de los parámetros de corte para ambas brocas.

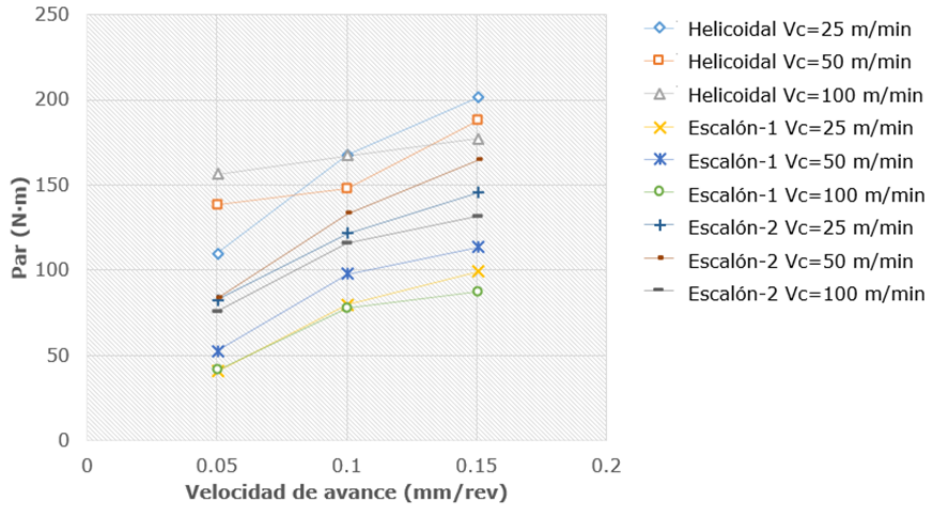


Fig. 5. Evolución del par de la herramienta en función de los parámetros de corte para ambas brocas.

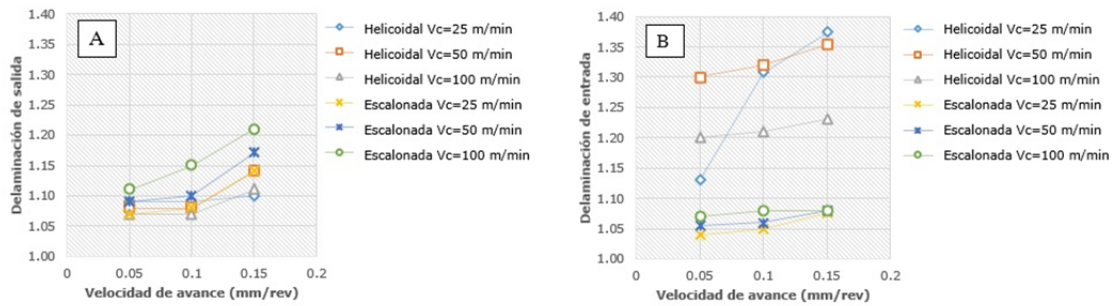


Fig. 6. Evolución de la delaminación a la entrada (A) y a la salida de la broca (B) para ambas herramientas.

Sin embargo, para el caso de la broca escalonada, la tendencia que se observa en las fuerzas máximas al cambiar la sección de la broca es casi inexistente. Este hecho supone una mejora respecto a la geometría convencional, ya que implica que el aumento de la velocidad de avance no conllevará un aumento de la zona dañada de forma tan severa como en el caso de la broca helicoidal. La velocidad de corte, sin embargo, aunque también tiene una influencia positiva, presenta un efecto casi despreciable en comparación la velocidad de avance para todos los casos. Estos resultados están en concordancia con resultados previos [19,20], tal y como se esperaba. La fuerza de avance en la geometría escalonada es menor que la obtenida en una geometría helicoidal, obteniéndose unas reducciones de hasta un 70% para el caso del segundo escalón.

El par medido (Fig. 5) sigue el mismo comportamiento que la fuerza de avance, en relación con el avance de la broca. Sin embargo, para el par se observa una ligera disminución al aumentar la velocidad de corte. Si se compara el par entre brocas, se puede obtener una reducción de en torno a un 75% de la geometría escalonada con respecto a la convencional.

El factor de delaminación (F_d), por otro lado, presenta una evolución similar a la fuerza de avance, como se muestra en la Fig. 6. En general, la geometría escalonada reduce la delaminación, especialmente a la entrada del agujero (Figura 6A alrededor de un 25%). El daño a la salida del agujero, es bajo cuando se trabaja con avances pequeños (Figura 6B). Este comportamiento se observó en trabajos similares [19].

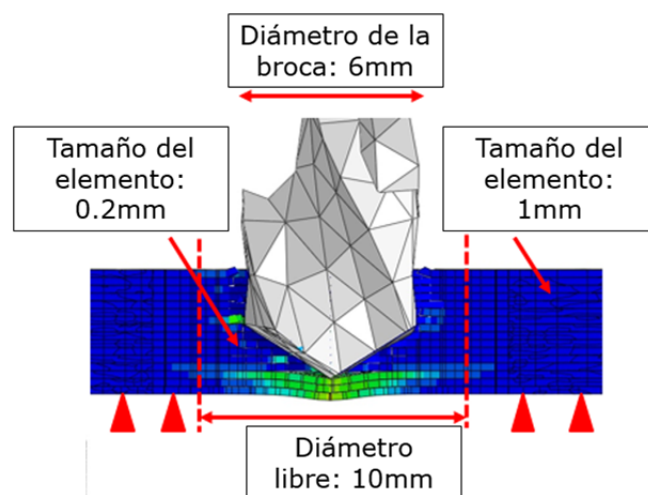


Fig. 7. Esquema del modelo numérico.

4. MODELO NUMÉRICO Y VALIDACIÓN

4.1. Implementación del modelo

El software ABAQUS/explicit, de uso común en la industria, se ha utilizado para desarrollar el modelo numérico de taladrado. Ambas geometrías han sido validadas, por lo que se ha obtenido su geometría mediante el software de dibujo SOLID EDGE y posteriormente se exportaron a ABAQUS. La broca se implementó como rígida para evitar obtener deformaciones y tensiones en la herramienta, ya que no es el caso de estudio.

Un esquema de las condiciones de contorno del modelo se presenta en la Fig. 7. Los movimientos de avance y rotación se impusieron en la broca y el desplazamiento en dirección Z se restringió en el material, salvo en el círculo de salida de la placa donde se apoya el material (10 mm).

El material se modeló con 2 tipos de elementos. Por un lado elementos *wedge* (C3D6R) en la zona cerca de la broca para minimizar la influencia de la orientación de la propagación de la fisura con un tamaño mínimo de 0.2 mm. En la zona lejana a la herramienta, se han utilizado elementos cúbicos C3D8R con reducción integrada y un tamaño mínimo de elemento de 1 mm. A lo largo del espesor se utiliza un único elemento.

4.2. Modelo de daño

La formación de la viruta requiere de la implementación de un modelo de fallo del material y de un criterio de erosión de elementos. El comportamiento mecánico de las láminas de tejido carbono/epoxi fue desarrollado basándose en el modelo de daño de Chang-Chang [30] con las propiedades detalladas en la tabla 1. Este modelo ha sido utilizado en otros estudios de la literatura [31,32]. Las ecuaciones 1-4 que rigen los diferentes tipos de fallo del modelo se recogen en la tabla 3 y se corresponden con el modelo definido por López-Puente [33] y empleado en trabajos posteriores del autor [34]. En la misma tabla, la variable de daño d_{ij} varía entre 0 y 1, σ_{ij} son los componentes del tensor de tensiones y X_c y X_t son la resistencia de la lámina a tracción y compresión en la dirección del uno y Y_t y Y_c en la dirección dos. S_{12} , S_{13} y S_{23} son los esfuerzos cortantes en las tres direcciones del plano y Z_c es la resistencia a través del espesor bajo compresión. Una subrutina de tipo VUMAT se desarrolló para implementar estos daños en el software ABAQUS. Cuando d_{ij} alcanza el valor 1, se considera que el material está completamente dañado y la resistencia se pierde, por lo que las componentes se modifican a 0. El tensor de deformaciones se calcula después de cada incremento y cuando una de las componentes alcanza el valor crítico, el elemento se elimina del modelo.

Tabla 3. Modos de fallo implementados en el modelo [33].

| Modo de fallo | Ecuación |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fallo de la fibra en dirección 1 | $d_{f1} \begin{cases} \frac{\sigma_{11}}{X_t} & \text{si } \sigma_{11} > 0 \\ \frac{ \sigma_{11} }{X_c} & \text{si } \sigma_{11} < 0 \end{cases} \quad (1)$ |
| Fallo de la fibra en dirección 2 | $d_{f2} \begin{cases} \frac{\sigma_{22}}{Y} & \text{si } \sigma_{22} > 0 \\ \frac{ \sigma_{22} }{Y_c} & \text{si } \sigma_{22} < 0 \end{cases} \quad (2)$ |
| Rotura de la matriz en el plano | $d_{m12} = \left \frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right \quad (3)$ |
| Rotura de la matriz a través del espesor | $d_{m3} = \frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_x} \right)^2 + \frac{Z_c \cdot \sigma_{33}}{4S_{13}S_{23}} + \left \frac{\sigma_{33}}{Z_c} \right + \max \left[\left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}} \right)^2, \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 \right] \quad (4)$ |

Tabla 4. Parámetros de la interface cohesiva [34].

| Parámetro | Valor |
|-------------------|----------------------|
| K_n | 2 GPa/mm |
| $K_{ss} = K_{nn}$ | 1.5 GPa /mm |
| G_n | 0.6 J/m ² |
| $G_s = G_t$ | 1.8 J/m ² |
| t_n | 11 MPa |
| $t_s = t_t$ | 45 MPa |

El daño inter-laminar se estima mediante el uso de elementos cohesivos. El comportamiento de estos elementos se basa en una ley de tracción-separación donde el comportamiento elástico se define mediante los parámetros de interfaz cohesivos (la rigidez y las energías críticas) que se presentan en la tabla 4 [34].

La iniciación del daño se implementa a través de un criterio de tensión cuadrático mostrado en la ecuación (5), donde t_n , t_s y t_t son la resistencia de la interfaz cohesiva en las direcciones normal y cortante respectivamente.

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{t_n} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{t_s} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t_t} \right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

El criterio de evolución del daño mostrado en la ecuación (6) se caracteriza por el índice de liberación de energía en las tres direcciones mencionadas anteriormente G_n , G_s y G_t (donde $\alpha = 1$). Los valores críticos de liberación de energía se representan como G_{Cn} , G_{Cs} y G_{Ct} .

$$\left(\frac{G_n}{G_{Cn}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_s}{G_{Cs}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_t}{G_{Ct}} \right)^\alpha \geq 1 \quad (6)$$

La delaminación se modela usando elementos cohesivos. La estrategia de mallado para estas laminas es la misma que se ha seguido para las láminas de composite. El espesor en este caso es de 5 micras.

4.3. Validación del modelo

El modelo se ha validado a través de la comparación de ensayos experimentales. La Fig. 8A compara la evolución de la fuerza de avance en ambos casos para una velocidad de corte de 100 m/min y un avance de 0.10 mm/rev. El modelo se ha validado en términos de máxima fuerza de avance para ambos escalones de la broca. Se puede observar como la curva muestra una buena predicción en términos de forma y magnitud. La Fig. 8B representa los máximos valores de fuerza de la primera sección de la broca (F1) y la segunda sección (F2). El máximo error se estima en torno al 11% para este parámetro.

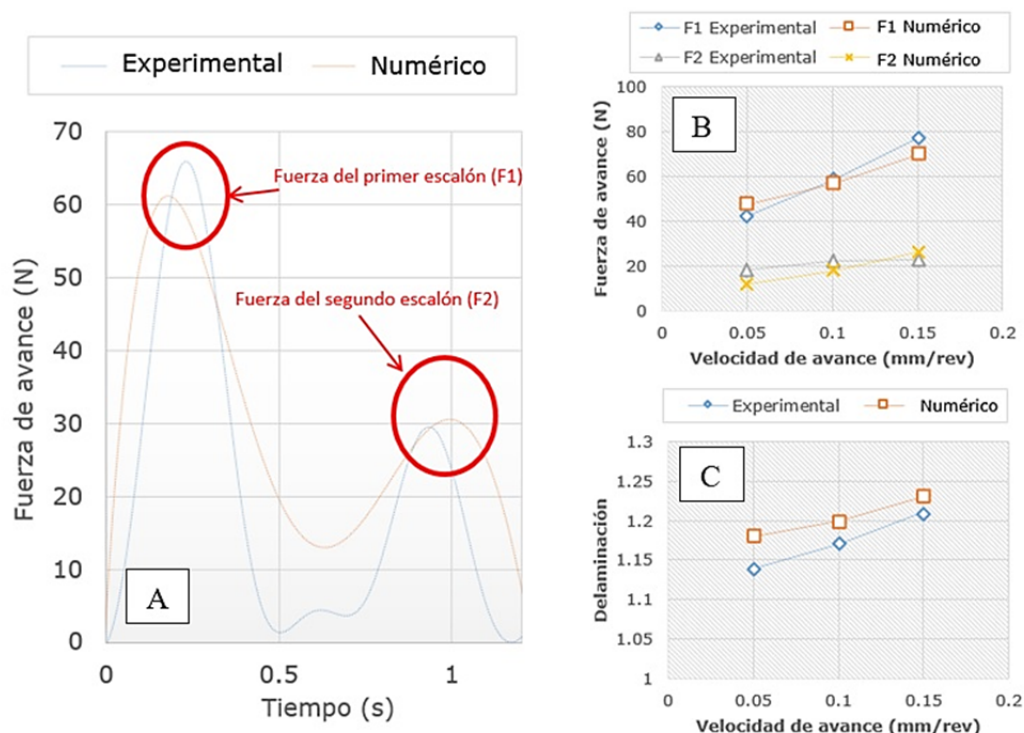


Fig. 8. Comparación entre valores experimentales y estimados por el modelo numérico en fuerza de avance (A). Predicción de la fuerza de avance (B) y de la delaminación (C).

Los valores de máxima delaminación encontrada a la salida del agujero se comparan en la Figura 8C siendo el máximo error de un 3.5%. Este error es aceptable para modelos complejos como el que se presenta en este estudio. La ligera sobreestimación de la delaminación se puede explicar mediante la caracterización de la interfaz con elementos cohesivos. Las propiedades requeridas para estos elementos no tienen en cuenta la dependencia de la velocidad de deformación

Se considera por tanto que el modelo proporciona unas predicciones razonables, por lo que se usará para el estudio paramétrico.

5. ESTUDIO PARAMÉTRICO

Una vez que el modelo se ha validado, numerosas simulaciones se llevaron a cabo para analizar la influencia de los parámetros de corte con más valores que los experimentales, del soporte de apoyo del material y del espesor del laminado en el caso de la geometría en escalón.

5.1. Parámetros de corte

La Fig. 9 presenta la evolución de la fuerza de corte con el avance para diferentes velocidades de corte. Se observa claramente como la influencia del avance es más significativa que la velocidad de corte como se obtuvo en los ensayos experimentales. La fuerza de avance se incrementó 3.8 veces cuando el avance se multiplica por 4 y se mantiene constante la velocidad de corte. Por otro lado, la misma fuerza solo aumenta 1.9 veces cuando la velocidad de corte se multiplica por 4 y se mantiene el avance constante. Se concluye por tanto que la relación es directa y positiva para ambos parámetros.

En cuanto a la delaminación se observa en la Fig. 10 que el factor de daño se multiplica por 1.1 cuando se multiplica la velocidad de avance por 4. Este hecho confirma la teoría expresada anteriormente sobre el impacto menor que tiene esta geometría especial sobre el daño al aumentar el avance de la broca.

5.2. Plato de apoyo

La influencia del diámetro del plato de apoyo se analiza en las Fig. 11 y 12. En el primer gráfico se puede observar que el incremento del agujero de salida afecta a la fuerza de avance incrementándola durante el taladrado, para ambas secciones de la geometría escalonada. Aumentar el diámetro de 6.5 mm a

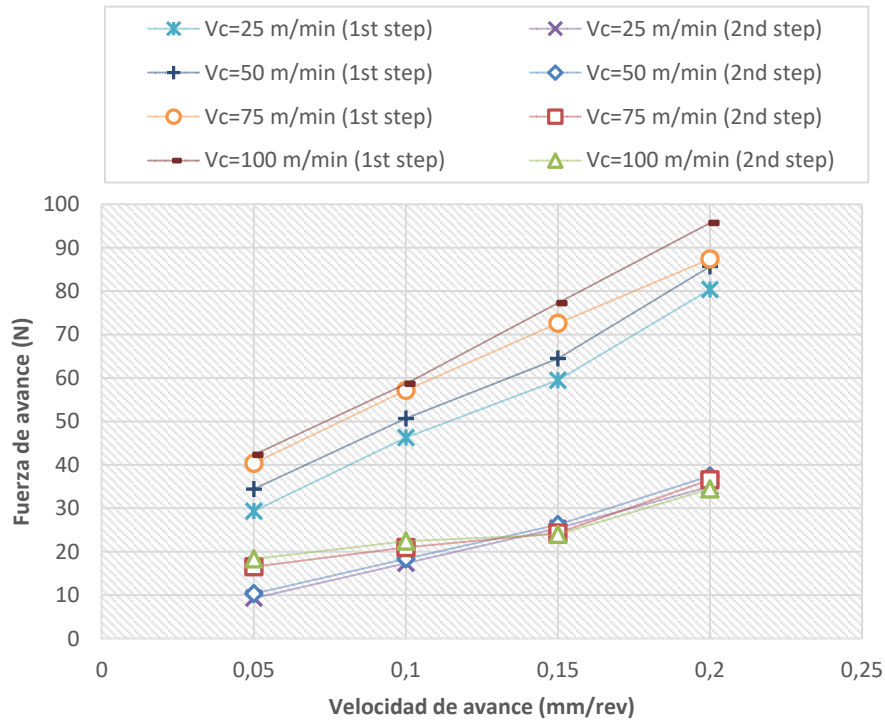


Fig. 9. Evolución de la fuerza de avance para diversos factores de corte estimados por el modelo numérico para ambas secciones de la broca escalonada.

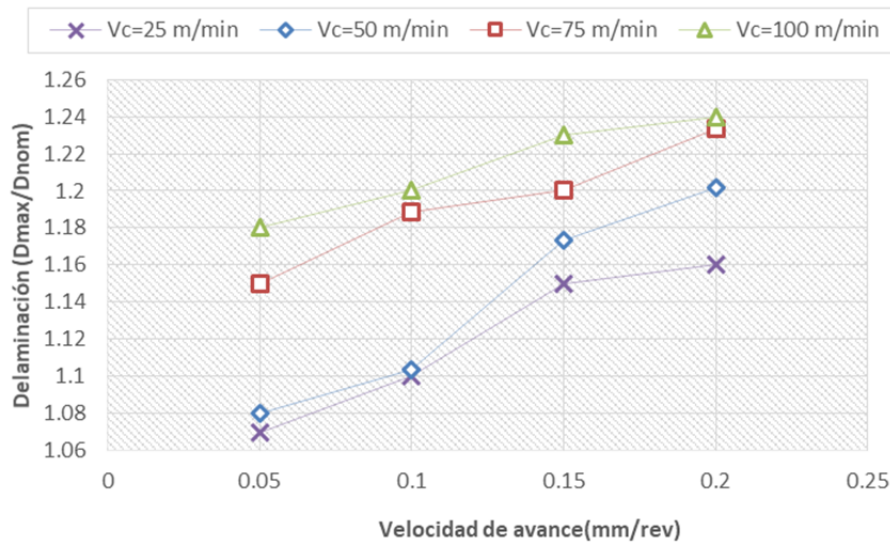


Fig. 10. Evolución de la delaminación para diversos factores de corte estimados por el modelo numérico.

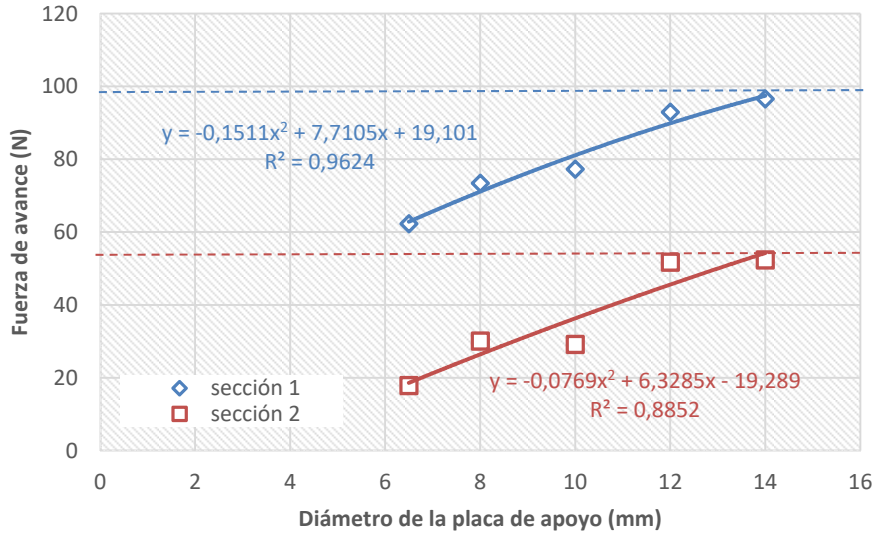


Fig. 11. Evolución de la fuerza de avance para ambas secciones de la broca escalonada en función del diámetro libre de la placa de apoyo. La línea discontinua representa el caso de taladrado sin superficie de apoyo.

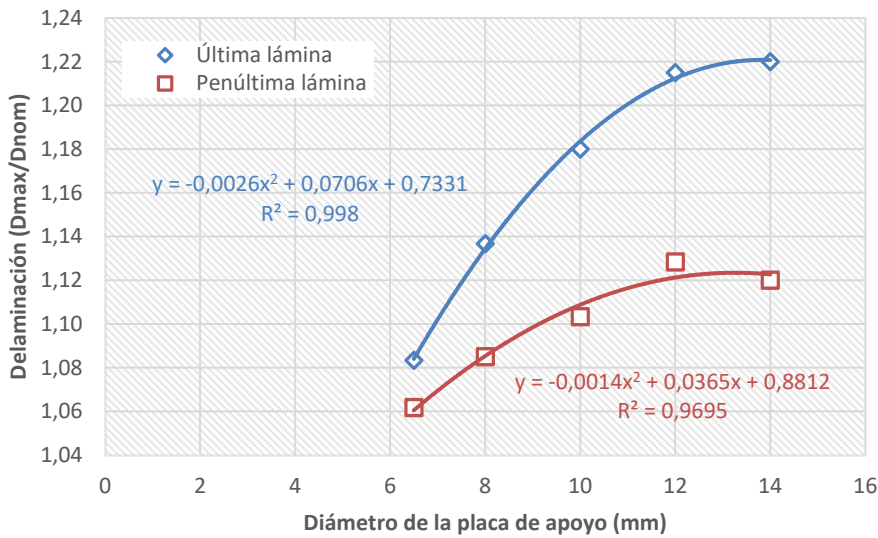


Fig. 12. Evolución de la delaminación la última y antepenúltima laminas del material en función del diámetro libre de la placa de apoyo.

14 mm supone un incremento de la fuerza de un 55% para la primera sección y de un 193% para la segunda sección. Para valores de diámetro mayores a 15 mm, el efecto de la superficie libre de la placa de soporte es equivalente a una probeta libre. La Fig. 12 presenta la evolución de la delaminación para la última y antepenúltima lámina. El incremento del daño con la variación del agujero es de un 13% y 7% respectivamente, y tiende a ser constante para diámetros mayores de 14 mm.

Los gráficos también muestran unas ecuaciones predictivas con un R^2 mayor a 0.86, lo que implica que las ecuaciones pueden ser utilizadas para predecir fuerzas y delaminaciones del mismo material ensayado, para un amplio rango de valores del diámetro libre de la placa de apoyo.

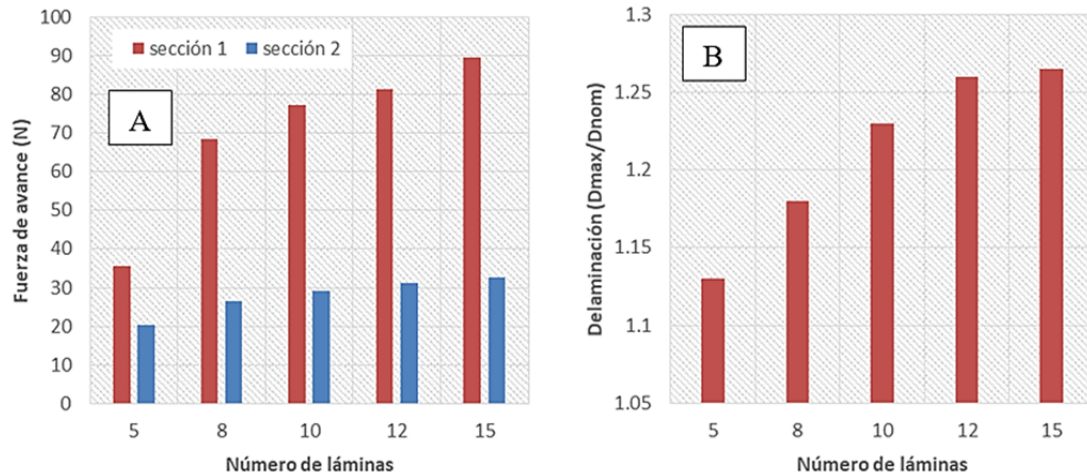


Fig. 13. Evolución de la fuerza de avance (A) y delaminación (B) en función del número de capas del laminado.

5.3. Espesor del laminado

El espesor del laminado también influye en la fuerza de avance como se puede observar en la Fig. 13, donde se han simulado diferentes grosores de probetas. Los resultados muestran una influencia clara del espesor en la fuerza de avance y en la delaminación, incrementando ambos parámetros con el espesor. Cabe resaltar la tendencia a estabilizarse de ambos parámetros a partir de un laminado de 12 capas, donde tanto la fuerza relativa al cambio de sección como la delaminación, tienden a ser similares. La distancia entre la primera sección ($\varnothing = 4$ mm) y la segunda ($\varnothing = 6$ mm) es fundamental.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un análisis experimental y numérico del proceso de taladrado en materiales CFRP con estructura tejida. Por un lado, se han comparado las geometrías de brocas helicoidal y escalonada. La comparación entre ambas brocas puso de relieve la disminución de la fuerza de avance y el daño por delaminación de la geometría especial en comparación con la geometría convencional.

Por otro lado, se ha desarrollado un modelo numérico para completar el estudio de la broca que presenta mejores condiciones de acabado, en este caso, la broca escalonada. Para validar el modelo se han comparado los resultados experimentales con los valores estimados del modelo. Se concluyó que el modelo muestra una buena estimación de los resultados en cuanto a fuerza de avance y delaminación.

El mismo modelo se utilizó para llevar a cabo un análisis paramétrico. Se amplió el rango de los parámetros de corte estudiados confirmando la relación positiva de ambos parámetros de corte con la fuerza de avance y el factor de daño. También se analizó el efecto del plato de apoyo concluyendo que su uso disminuye el daño y mejora la calidad del agujero taladrado. Por último, se comprobó la relación entre el espesor del laminado y el daño generado durante la operación, siendo de nuevo una relación creciente y directa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación aportada por el Ministerio de Economía y Competitividad de España bajo el proyecto con referencia DPI2011-25999, del programa FEDER y el subprograma asociado de ayudas FPI con referencia BES- 2012-055162

REFERENCIAS

- [1] Liu, D.F., Tang, Y.J., Cong, W.L., “A review of mechanical drilling for composite laminates”, *Composites Structures*, **94**, 1265–1279 (2012)
- [2] López de Lacalle, L.N., Fernández, A., Olvera, D., Lamikiz, A., Olvera, D., Rodríguez, C., “Monitoring deep twist drilling for a rapid manufacturing of light highstrengthparts”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **25**, 2745–2752 (2011)
- [3] Pujana, J., Rivero, A., Celaya, A., López de Lacalle, L.N., “Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **49**, 500–508 (2009)
- [4] Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F., Castanie, B., “Machinability and surface quality during high speed trimming of multi directional CFRP”, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, **13**, 289–310 (2013)
- [5] Haddad, M., Zitoune, R., Bouguerara, H., Eyma, F., Castanie, B., “Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behaviour”, *Composites Part B* **57**, 136–143 (2014)
- [6] Feito, N., Díaz-Álvarez, J., Díaz-Álvarez, A., Cantero, J.L., Miguélez, M.H., “Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling of woven CFRPs”, *Materials*, **7**, 4258–4271 (2014)
- [7] Girot, F., Iliescu D., Fernandez A., Gutiérrez-Orrantia M.E., López de Lacalle L.N., “Experimental study and modeling of tool wear in drilling and trimming of CFRP”, *Journal of Composite Materials*, **23**, 357–385 (2013)
- [8] Grilo, T.J., Paulo, R.M.F., Silva, C.R.M., Davim, J.P., “Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries”, *Composites Part B* **45**, 1344–1350 (2013)
- [9] Davim, J.P., Reis, P., “Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) using design experiments”, *Composites Structures*, **59**, 481–487 (2003)
- [10] Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Rubio, J. C., Correia, A.E., Abrao, A.M., Davim, J.P., “Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, **203**, 431–438 (2008)
- [11] Krishnaraj, V., Prabukarthi, A., Ramanathan, A., Elanghovan, N., Senthil Kumar, M., Zitoune, R., Davim, J.P., “Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates”, *Composites Part B*, **43**, 1791–1799 (2012)
- [12] Gaugel, S., Sripathy, P., Haeger, A., Meinhard, D., Bernthaler, T., Lissek, F., Kaufeld, M., Knoblauch, V., Schneider, G., “A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)”, *Composite Structures*, **155**, 173–83 (2016)
- [13] Karnik, S.R., Gaitonde, V.N., Rubio, J.C, Correia, A.E., Abrao, A.M., Davim, J.P., “Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model”, *Materials Design*, **29**, 1768–1776 (2008)
- [14] Tsao, C.C., Hocheng, H., “Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**, 1085–1090 (2004)
- [15] Tsao, C.C., Hocheng, H., “Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45**, 1282–1287 (2005)
- [16] Feito, N., Diaz-Álvarez, A., Cantero, J.L., Rodríguez-Millán, M., Miguélez, H., “Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **35**, 33–55 (2016)
- [17] Hocheng, H., Tsao, C.C., “Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**, 1403–1416 (2006)
- [18] Hocheng, H., Tsao, C.C., “Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits”, *Journal of Materials Processing Technology*, **140**, 335–339 (2003).
- [19] Durao, P., Goncalves, J.S., Tavares, R.S., Albuquerque, C., Aguiar, A., Torres, A., “Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates”, *Composites Structures*, **92**, 1545–1550 (2010)
- [20] Shyha, I.S., Soo, S.L., Aspinwall, D., Bradley, S., “Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, 1023–1034 (2010)

- [21] Brinksmeier, E., Janssen, R., “Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **51**, 87–90 (2002)
- [22] Marques, T., Durao, M., Magalhaes, G., Silva, F., Tavares, R.S., “Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: evaluation of a special step drill”, *Composites Science and Technology*, **69**, 2376–2382 (2009)
- [23] Singh, I., Bhatnagar, N., Viswanath, P., “Drilling of uni directional glass fiber reinforced plastics: experimental and finite element study”, *Materials and Design*, **29**, 546–53 (2008)
- [24] Durao, L.M.P., de Moura, M.F.S.F., Marques, A.T., “Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates”, *Composites Part A* **37**, 1325–1333 (2006)
- [25] Durao, L.M.P., de Moura, M.F.S.F., Marques, A.T., “Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composite laminates”, *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 2767–2778 (2008)
- [26] Isbilir, O., Ghassemieh, E., “Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites”, *Composite Structures*, **105**, 126–133 (2013)
- [27] Phadnis, V.A., Makhadm, F., Roy, A., Silberschmidt, V.V., “Drilling in carbon/epoxy composites: experimental investigations and finite element implementation”, *Composites Part A*, **47**, 41–51 (2013)
- [28] Feito, N., Díaz-Álvarez, J., López-Puente, J., Miguélez, M.H., “Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs”, *Composite Structures*, **138**, 285–294 (2016)
- [29] Feito, N., López-Puente, J., Santiuste, C., Miguélez, M.H., “Numerical prediction of delamination in CFRP drilling”, *Composite Structures*, **108**, 677–683 (2014)
- [30] Chang, F., Chang, K.A., “A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations”, *Journal of Composite Materials*, **21**, 834–55 (1987)
- [31] Hou, J.P., Petrinic, N., Ruiz, C., Hallet, S.R., “Prediction of impact damage in composite plates”, *Composites Science and Technology*, **60**, 273–2781 (2000)
- [32] Iannucci, L., Willows, M., “An energy based damage mechanics approach to modelling impact onto composite materials – part I: numerical models”, *Composites Part A*, **37**, 2041–56 (2003)
- [33] López-Puente, J., Zaera, R., Navarro, C., “Experimental and numerical analysis of normal and oblique ballistic impacts on thin carbon/epoxy woven laminates”, *Composites Part A*, **39**, 374–387 (2008)
- [34] Varas, D., Artero-Guerrero, J.A., Pernas-Sánchez, J., López-Puente, J., “Analysis of high velocity impacts of steel cylinders on thin carbon/epoxy woven laminates”, *Composite Structures*, **95**, 623–9 (2013)

NUMERICAL ANALYSIS OF DIFFERENT TOOL GEOMETRIES FOR CFRP DRILLING

Abstract – During the last years, the use of long fiber reinforced polymeric composite materials has experienced a considerable increase in the industry, especially in the aeronautical industry. This is mainly due to the excellent resistance-weight ratio, which places it as a suitable material capable of replacing traditional materials such as steel. One of the most common operations performed on these materials is the drilling of holes, especially in the production of large structures where the union of parts by screws is inevitable. The present work focuses on studying this operation, analyzing the influence of the drill bit both in the cutting force and in the damage generated during drilling. Two different geometries (one helicoidal and one stepped) have been tested on polymeric reinforced with carbon fiber material (CFRPs). Results showed the improvement of the quality of the holes in the case of using a stepped drill, but only working at low feed rates. With the intention of carrying out a deeper parametric study, a three-dimensional numerical model has been developed. Through experimental results, the model has been validated and used to study the influence of several factors that affect the quality of the drill, such as the supporting plate of the laminate or its thickness.

Keywords – Drilling, CFRP, Composite material, delamination, FEM.