

Estudio de la fuerza de avance y la circularidad de los agujeros en el taladrado criogénico de materiales compuestos con aramida

Rosario Domingo-Navas¹, Jorge Ayllón-Pérez², Manuel Rodríguez-Martín³, Beatriz de Agustina-Tejerizo⁴

¹ Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), España. Email: rdomingo@ind.uned.es

² Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), España. Email: jorge.ayllon@ind.uned.es

³ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Salamanca, España. Email: ingmanuel@usal.es

⁴ Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), España. Email: bdeagustina@ind.uned.es

Resumen

El uso de refrigerantes criogénicos en los procesos de mecanizado en los últimos años están teniendo una especial atención, así como su incidencia cuando se usan materiales compuestos, como aquellos reforzados por fibras de aramida o kevlar. Este trabajo analiza los resultados experimentales del taladrado criogénico con nitrógeno líquido en pletinas de aramida, en las fuerzas de avance, los diámetros de los agujeros taladrados y la rugosidad de las paredes, para posteriormente realizar un análisis mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM). Este trabajo encuentra que, en el rango de las condiciones de corte empleadas, el diámetro del agujero no depende de la velocidad de rotación de la broca, mientras que la fuerza de avance y la rugosidad son dependientes de la velocidad de rotación y de avance; además aporta resultados que muestran la viabilidad de este proceso a temperaturas inferiores a -150°C .

Palabras clave: taladrado criogénico; aramida; fuerza de avance; circularidad.

Abstract

In recent years, the use of cryogenic coolants in machining processes are receiving special attention, as well as their influence when composite materials are used, such as those reinforced by aramid o kevlar fibers. This work analyzes the experimental results of cryogenic drilling with liquid nitrogen in aramid plates, in the thrust forces, the diameters of the drilled holes and the roughness of the walls, and later to carry out an analysis by response surface methodology (RSM). This work find that, in the range of cutting conditions used, the hole diameter is not dependent on drill rotation speed, but the thrust forces and roughness are dependent on drill rotation speed and feed rate. Moreover, this analysis show the viability of cryogenic drilling in aramide plates at temperatures near to -150°C .

Keywords: cryogenic drilling; aramid; thrust force; circularity.

1. Introducción

En los últimos años, el uso de refrigerantes criogénicos en los procesos de mecanizado está teniendo una especial atención. El aumento de temperatura que se genera durante la eliminación de material ha llevado a investigaciones sobre nuevos procedimientos para reducir la transmisión de calor. Algunos de estos

métodos son el enfriamiento por aire comprimido mediante un tubo Vortex o el enfriamiento con técnicas criogénicas. En el primero de ellos, donde se alcanzan temperaturas inferiores a -20°C durante el proceso de fabricación, se han podido mejorar variables como la fuerza de avance o la potencia [1-2]. En los procedimientos específicos criogénicos, en los que se alcanzan temperaturas inferiores a -100°C , se suelen

emplear como refrigerantes CO₂ líquido o nitrógeno líquido, LN₂. Se ha encontrado que con el uso de CO₂ líquido es posible incrementar la vida de la herramienta utilizada en el arranque de viruta de aleaciones de difícil mecanizado [3]; algunos resultados después del uso de nitrógeno líquido se dirigen hacia la consiguiente mejora de la calidad de los agujeros taladrados [4] y más concretamente, la rugosidad de las paredes taladradas [5]; además cabe resaltar que el hecho de requerir menores fuerzas, durante el proceso de corte, puede permitir alcanzar una mejor calidad superficial, entre otros aspectos, hecho que se ha ido corroborando en diferentes operaciones además del taladrado, como es el caso del fresado [6-7].

Por otra parte los materiales compuestos, cada día más usados en la industria, y aunque en ellos el incremento de la temperatura durante el mecanizado es mucho menor que en los metales, algunos estudios han mostrado que mejoran algunas propiedades como y se consume menos energía lo que lleva a un proceso más sostenible.

Los materiales compuestos con fibras de aramida o fibras kevlar son difíciles de mecanizar, por tanto, el objetivo es encontrar un procedimiento que consiga mejores resultados respecto a las fuerzas necesarias y la calidad de los agujeros del taladrado. En los resultados de las variables durante y después del taladrado influyen muchos factores, comenzando por las brocas, con lo que se obtienen resultados muy diversos [8-9]. La literatura académica muestra algunas alternativas, como el taladrado por láser [10] y este trabajo se centra en otra opción como es el mecanizado criogénico con nitrógeno líquido, con el objetivo de determinar su viabilidad en compuestos con fibras de aramida mediante el análisis de las fuerzas de avance, el diámetro de los agujeros taladrados y la rugosidad de sus paredes.

2. Metodología

En esta Sección se describen los procedimientos experimentales y estadísticos seguidos en el desarrollo de este artículo.

2.1. Procedimiento experimental

Los ensayos se han llevado a cabo en un centro de mecanizado de control numérico Manga Tongtai TMV-510, con brocas de 6 mm de diámetro y con la punta de la broca de diamante policristalino (ver características generales de la broca en la Figura 1) suministradas por la empresa FMT Tooling Systems. Las condiciones de corte utilizadas oscilan entre 2000 y 6000 rpm en la velocidad de rotación de la broca (N) y entre 200 y 600 mm/min en la velocidad de avance (f). El tipo de broca se ha seleccionado porque está diseñada para mecanizar materiales compuestos como

el que es objeto en este artículo; además está recomendada para altas condiciones de corte, por lo que la velocidad de rotación y de avance de la broca se han acotado teniendo en cuenta este aspecto.

El material compuesto elegido son pletinas de 2 mm de espesor, con fibras de aramida como refuerzo y epoxi como resina.


	Material de la punta: PCD - Diamante policristalino
	Longitud total de la broca: 93 mm
	Longitud de la hélice: 57 mm
	Ángulo de la punta: 120°
	Ángulo de la hélice: 30°
Tolerancia de la punta: m7	

Figura 1. Características de la broca utilizada. Fuente: elaboración propia.

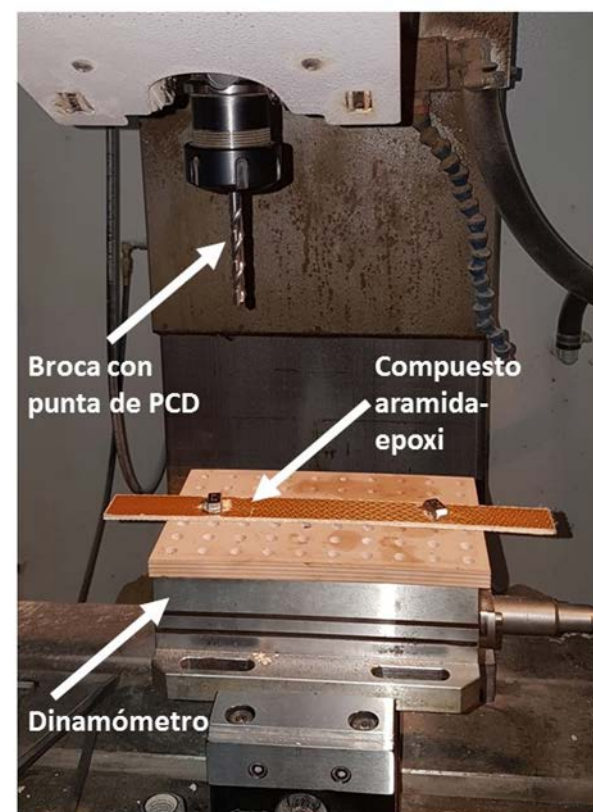


Figura 2. Montaje del dinamómetro en el centro de mecanizado. Fuente: elaboración propia.

El taladrado se ha ejecutado en un entorno criogénico, empleando nitrógeno líquido como refrigerante, suministrado por Air Liquid. Durante el taladrado se han alcanzado temperaturas de -128 °C, que han sido medidas mediante un pirómetro por infrarrojos Optris,

con mira láser que incide directamente en la punta de la broca.

El proceso de corte ha sido monitorizado con un dinamómetro piezoeléctrico Kistler 9257B (ver el montaje del dinamómetro en la Figura 2), conectado a un amplificador multicanal Kistler 5070A, el cual permite transformar en magnitudes físicas, en este caso, la fuerza de avance, las señales eléctricas captadas por el dinamómetro, para que posteriormente sean tratadas por medio del software DasyLab. De esta manera se han obtenido las fuerzas de avance (F_z) en la dirección del eje Z, expresadas en N.

La calidad de los diámetros se ha obtenido cotejando los diámetros con una máquina de medición por coordenadas, Mitutoyo BX 303 y empleando el procedimiento de mínimos cuadrados; la diferencia entre el diámetro más desfavorable y el nominal (ΔD) en mm se ha utilizado en este análisis.

La calidad superficial se ha determinado por medio de un rugosímetro Mitutoyo SJ-400 que ha facilitado la medida de la rugosidad media (R_a) en μm .

2.2. Procedimiento estadístico

Finalmente, los resultados han sido tratados por el software Statgraphics, con el objetivo de usar la metodología de superficie de respuesta (RSM – Response Surface Methodology) y determinar si las condiciones de corte influyen en los resultados. Esto engloba un diseño de experimentos 3×2 , así como un análisis de la varianza (ANOVA- Analysis of Variance), para determinar los factores significativos con un nivel de confianza del 95%, dentro de un modelo de segundo orden.

El estudio ANOVA muestra datos de la suma de cuadrados, grados de libertad, cuadrado medio, el F-ratio calculado a partir de la distribución de Fisher-Snedecor y su probabilidad asociada (P-valor), para cada uno de los factores considerados y sus interacciones. Para un niveles de confianza del 95%, se considera que el factor es significativo si su P-valor es inferior a 0,05 [11]. También se determina el porcentaje de contribución de los factores significativos, que es calculado como el cociente de la suma de cuadrados de un factor dado entre el total de la suma de cuadrados.

También se expone el coeficiente de determinación, R^2 , del ajuste llevado a cabo. Este coeficiente que proporciona el valor entre la variación explicada y la variación total, se considera aceptable para estimaciones superiores al 80% [11].

La metodología RMS también permite encontrar el valor óptimo de los parámetros o factores para cada una de las variables, teniendo en cuenta si se quiere maximizar, minimizar o mantener un determinado valor.

3. Resultados

Análogamente a la Sección anterior y en coherencia con los objetivos del artículo, este apartado se estructura con resultados experimentales y el análisis estadístico derivado de la aplicación de la metodología RSM.

3.1. Resultados experimentales

Las condiciones de corte se detallan en la Tabla 1 para cada tipo de ensayo realizado, mientras que en la Tabla 2 se indican los resultados de las tres variables objeto de estudio.

Tabla 1. Condiciones de corte.

Nº ensayo	N [rpm]	f [mm/min]
1	2000	200
2	2000	400
3	2000	600
4	4000	200
5	4000	400
6	4000	600
7	6000	200
8	6000	400
9	6000	600

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Resultados experimentales.

Nº ensayo	F_z [N]	ΔD [mm]	R_a [μm]
1	78	0,0272	3,16
2	63	0,0061	4,67
3	64	0,0041	6,01
4	84	0,0635	2,82
5	78	0,0107	3,89
6	70	0,0000	4,61
7	92	0,0423	2,12
8	81	0,0070	3,51
9	75	0,0046	4,12

Fuente: elaboración propia.

Las fuerzas de avance alcanzadas son relativamente pequeñas, y no existen grandes diferencias entre ellas, probablemente debido al reducido espesor de la pletina y al uso de una broca diseñada para este tipo de materiales compuestos.

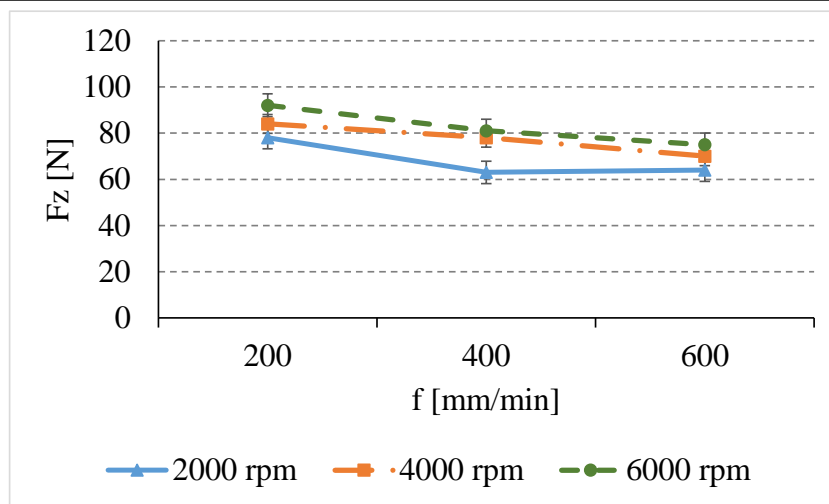


Figura 3. Fuerzas de avance. Fuente: elaboración propia.

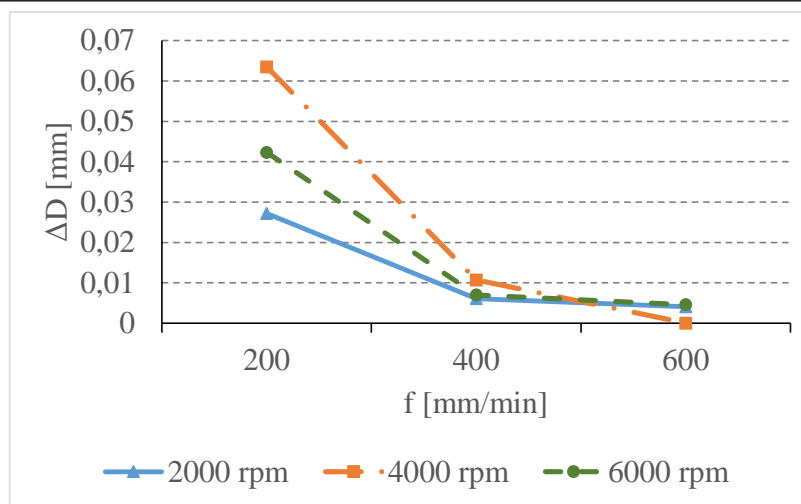


Figura 4. Diferencia entre diámetro nominal y obtenido. Fuente: elaboración propia.

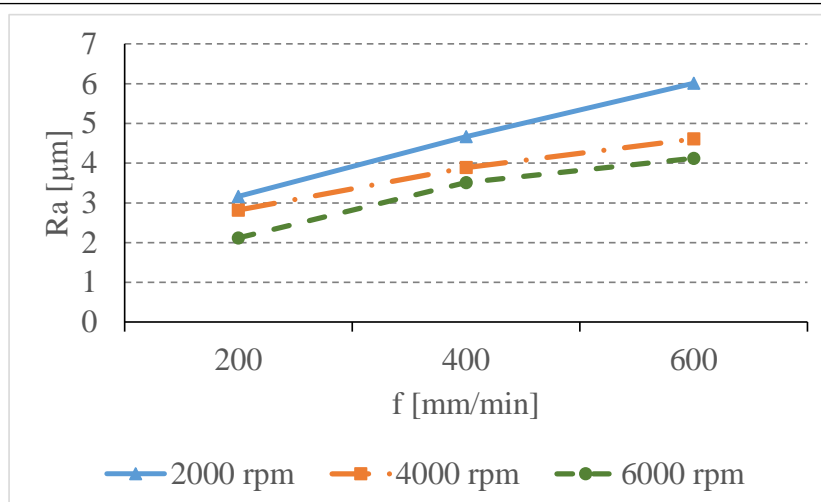


Figura 5. Rugosidad. Fuente: elaboración propia.

La literatura muestra cómo en pletinas reforzadas con fibras kevlar, las fuerzas de avance aumentan al hacerlo las velocidades de rotación de la broca y de avance [12], aunque en este caso, el avance provoca una ligera disminución de las mismas. En la Figura 3 puede observarse claramente esa disminución en las fuerzas según se modifican las condiciones de corte.

En cuanto a los diámetros, las desviaciones obtenidas apenas muestran diferencias entre ellas cuando aumentan las velocidades, aunque dichas desviaciones se reducen (ver Tabla 2 y Figura 4) y son inferiores a otras encontradas en la literatura [13].

Respecto a la rugosidad media, puede afirmarse que ésta aumenta al hacerlo la velocidad de avance pero se reduce si la velocidad de rotación de la broca se incrementa. (ver Tabla 2 y Figura 5).

3.2. Resultados de la superficie de respuesta

Dentro del análisis RSM, el análisis de la varianza (ANOVA) se ha determinado para Fz (Tabla 3), ΔD (Tabla 4) y Ra (Tabla 5).

Tabla 3. ANOVA para Fz.

Fuente	Suma de cuadrados	GdL	Cuadrado medio	F-ratio	P-valor
A:N	308,167	1	308,167	32,79	0,0106
B:f	337,5	1	337,5	35,91	0,0093
AA	6,7222	1	6,7222	0,72	0,4598
AB	2,25	1	2,25	0,24	0,6582
BB	20,0556	1	20,0556	2,13	0,2402
Error total	28,1944	3	9,39815		
Error correg.	702,889	8			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. ANOVA para ΔD.

Fuente	Suma de cuadrados	GdL	Cuadrado medio	F-ratio	P-valor
A:N	0,00004	1	0,00004	0,33	0,6048
B:f	0,00257	1	0,00257	18,85	0,0226
AA	0,00018	1	0,00018	1,33	0,3330
AB	0,00005	1	0,00005	0,39	0,5765
BB	0,00049	1	0,00049	3,60	0,1540
Error total	0,00041	3	0,00014		
Error correg.	0,00376	8			

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. ANOVA para Ra.

Fuente	Suma de cuadrados	GdL	Cuadrado medio	F-ratio	P-valor
A:N	2,78802	1	2,78802	50,04	0,0058
B:f	7,34827	1	7,34827	131,8	0,0014
AA	0,05014	1	0,05014	0,90	0,4128
AB	0,18062	1	0,18062	3,24	0,1696
BB	0,09389	1	0,09389	1,69	0,2850
Error total	0,16715	3	0,05572		
Error correg.	10,6281	8			

Fuente: elaboración propia

Un análisis más pormenorizado indica, desde la perspectiva estadística, que ambas velocidades son significativas en la determinación de las fuerzas (ver Tabla 3) pues las cifras alcanzadas para P-valor son menores de 0,05 para un nivel de confianza del 95%. De acuerdo a los datos de la Tabla 3, su porcentaje de contribución puede cuantificarse en un 44% para “N” y un 48% para “f”. Sin embargo para la variación de los diámetros sólo es significativa la velocidad de avance, con un P-valor de 0,0226 y una influencia de un 68,55% (ver Tabla 4). Finalmente, y respecto a la rugosidad media, son significativas ambas velocidades, con una contribución del 26,23% para “N” y un 69,14% para “f” (ver Tabla 5).

El análisis RSM muestra la relación de Fz respecto a “N” y “f”, de acuerdo a la ecuación (1). El ajuste presenta un coeficiente de determinación R² de 95,98%.

$$Fz = 78,22 + 0,008 \times N - 0,093 \times f - 4,5 \times 10^{-7} \times N^2 - 18,7 \times 10^{-7} \times N \times f + 79,2 \times 10^{-6} \times f^2 \quad (1)$$

El ajuste para ΔD se expresa en la ecuación (2). Este ajuste tiene un coeficiente R² de 89,1%.

$$\Delta D = 0,06 + 0,000024 \times N - 0,00038 \times f - 2,38 \times 10^{-9} \times N^2 - 9,12 \times 10^{-9} \times N \times f + 3,92 \times 10^{-7} \times f^2 \quad (2)$$

De manera similar, la ecuación (3) muestra el ajuste correspondiente para Ra, con un coeficiente R² de 98,19%.

$$Ra = 1,98 - 0,00041 \times N + 0,012 \times f + 3,54 \times 10^{-8} \times N^2 - 5,31 \times 10^{-7} \times N \times f - 5,2 \times 10^{-6} \times f^2 \quad (3)$$

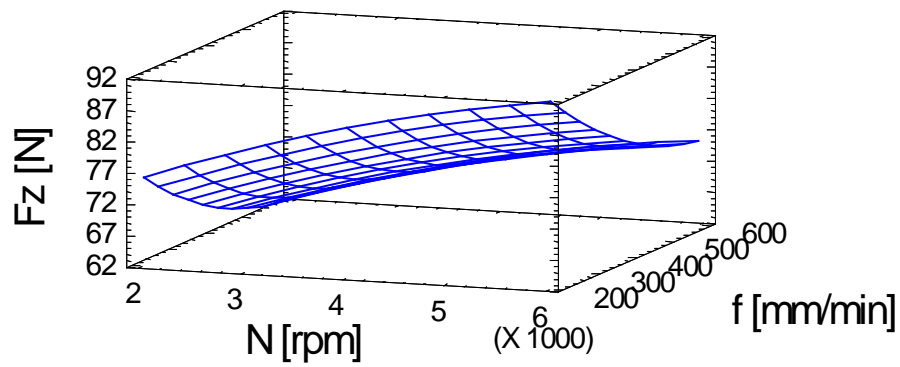


Figura 6. Superficie de respuesta estimada para las fuerzas de avance. Fuente: elaboración propia.

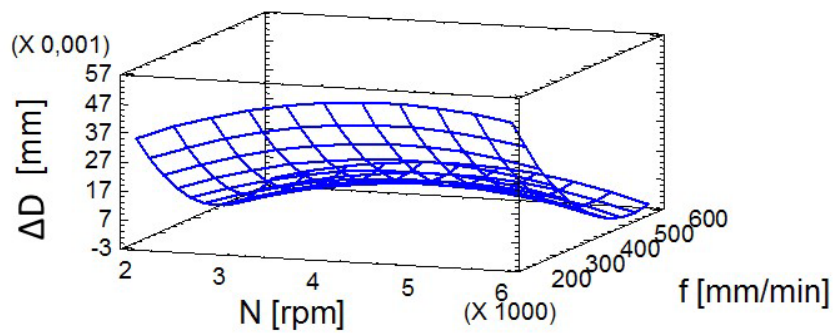


Figura 7. Superficie de respuesta estimada para la diferencia de diámetros entre nominal y obtenido. Fuente: elaboración propia.

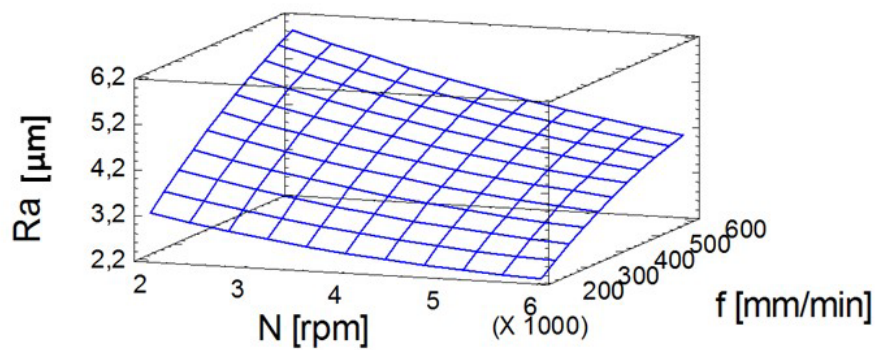


Figura 8. Superficie de respuesta estimada para la rugosidad. Fuente: elaboración propia.

Todos los ajustes son aceptables dado el coeficiente de determinación, R^2 , alcanzado.

Lo anteriormente comentado puede observarse gráficamente en las Figuras 6, 7 y 8, donde la superficie de respuesta representa el modelo de segundo orden. La Figura 6 muestra que el valor mínimo de las fuerzas se obtiene para una condiciones de $N = 2000$ rpm y $f = 600$ mm/min; probablemente la evacuación de la viruta no se dificulta ante un elevado avance. La Figura 7 muestra el valor óptimo de la variación del diámetro se alcanzaría para $N = 2225$ rpm y $f = 548$ mm/min. En la Figura 8 puede verse el comportamiento de la rugosidad media, observando que se obtiene una disminución próxima al 65% para $N = 6000$ rpm y $f = 200$ mm/min respecto al mayor valor encontrado. En estas tres Figuras, 6, 7 y 8, se aprecia un comportamiento muy diferente de las variables al modificar los valores de los parámetros. Sin embargo, dado que las fuerzas no son muy elevadas en ningún caso, y las variaciones de diámetro son muy reducidas, velocidades de rotación de 6000 rpm y de avance de 200 mm/min que proporcionan la menor rugosidad parecen más recomendables.

4. Conclusiones

Considerando las variables, fuerzas de avance, variación del diámetro de los agujeros taladrados y la rugosidad media de las paredes, el mecanizado de compuestos de fibras de aramida, a -150 °C usando como refrigerante nitrógeno líquido, puede afirmarse que es viable, en el rango de las condiciones de corte definidas.

El trabajo aporta resultados que mejoran los obtenidos hasta ahora en la literatura en el material compuesto utilizado, todo ello posibilitado gracias a las bajas temperaturas alcanzadas por las brocas durante el proceso de taladrado.

Una de las limitaciones de este estudio es la falta de análisis de las rebabas, uno de los principales problemas de los compuestos con fibras de aramida, y que será objeto de análisis en un desarrollo futuro.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen, al Ministerio de Ciencia e Innovación, la financiación a través del proyecto RTI2018-102215-B-I00.

6. Referencias

[1] R. Domingo, B. de Agustina, M.M. Marín. “A Multi-Response Optimization of Thrust Forces, Torques, and the Power of Tapping Operations by Cooling Air in Reinforced and Unreinforced

Polyamide PA66”. *Sustainability*, vol. 10, n° 3, pp. 889, 2018. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/889/htm>

[2] R. Domingo, B. de Agustina, M.M. Marín. Study of Drilling Process by Cooling Compressed Air in Reinforced Polyether-Ether-Ketone. *Materials*, vol. 13, n° 8, pp. 1965, 2020. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/8/1965>

[3] O. Pereira, A. Celaya, G. Urbikaín, A. Rodríguez, A. Fernández-Valdivielso, L.N López de Lacalle. “CO₂ cryogenic milling of Inconel 718: cutting forces and tool wear”. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, n° 4, pp. 8459-8468, 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420313879>

[4] 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 & Design*, vol. 89, pp. 996–1006, 2016. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127515306286>

[5] Basmaci, G.; Yoruk, A.S.; Koklu, U.; Morkavuk, S. Impact of Cryogenic Condition and Drill Diameter on Drilling Performance of CFRP. *Applied Sciences*, vol. 7, pp. 667, 2017. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/7/667>

[6] R. Domingo, M.M. Marín, B. de Agustina. “Study of the roughness of carbon fiber-reinforced composite plates in peripheral cryogenic milling”. *AIP Conference Proceedings*, vol. 2113, n° 1, pp. 080013, 2019. Disponible en: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5112621>

[7] R. Domingo, B. de Agustina, M.M. Marín. “An analysis of the forces in the cryogenic peripheral milling of composites reinforced with carbon fiber”. *Procedia Manufacturing*, vol. 41, pp. 423-429, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919311151>

[8] D. Bhattacharyya, D.P.W. Horrigan. “A study of hole drilling in kevlar composites”. *Composites Science and Technology*, vol. 58, pp. 267-283, 1998. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353897001279>

[9] F.J. Wang, M. Zhao, J.-B. Yan, S. Qiu, X. Liu, B.-Y. Zhang. “Investigation of Damage Reduction when Dry-Drilling Aramid Fiber-Reinforced Plastics Based on a Three-Point Step Drill”. *Materials*, vol. 13, pp. 5457, 2020. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/23/5457>

[10] K.P. Singh, A. Bahl, G. Norkey, G.D. Gautam. “Experimental investigation and parametric optimization of the hole-circularity and taper angle during laser drilling kevlar-29 fiber composite”. *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, n° 6, pp. 3325-3329, 2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321066591>

[11] D.C. Montgomery. “Design and Analysis of Experiments”, 8th ed., JohnWiley & Sons Inc.: New York, NY, USA, 2012.

[12] A. Mohan Kumar, R. Parameshwaran, R. Rajasekar, V.C. Harissh Ragavendra, N. Praveenraj. “Effect of thrust force, torque, and induced temperature on Kevlar reinforced composites during drilling process”. *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 522–528, 2021. Disponible en: <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S2214785320309135>

[13] J.H. Lee, J.C. Ge, J.H. Song. “Study on Burr Formation and Tool Wear in Drilling CFRP and its Hybrid Composites”. *Applied Sciences*, vol. 11, pp. 384, 2021. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/384>