

ANALYSIS OF ENERGY REQUIRED DURING THE DRY DRILLING OF HIGH PERFORMANCE OF POLYAMIDE PA 66 GF30

Domingo Navas, R.; García García, M.; Gómez Antón, R.

UNED

In the last years, the composite materials, in particular the organic matrix composite materials, reinforced with glass fiber as polyamide PA 66 GF30, are being deeply studied due to its importance industrial. This material is used as substitute of metals, wood or glass. However, aspects related to the sustainability as energy required during the drilling are not considered. Moreover, it is necessary the use of drill of high performance to improve the outcomes. This paper presents an experimental study about the effect of different parameters on the calculation of the energy during the dry drilling of high performance in PA 66 GF30. Thus, two drills types have been used diverse cutting conditions. The drills materials are high speed steel without coating, WC with coating and WC with point of diamond. In the tests, the energy has been calculated by means of thrust forces and torques, determined by a piezoelectric dynamometer, which allows obtaining their values during the drilling process. Results provide information of the influence according to the torque value, in particular. Some conclusions allow pointing to the drill recommend under different cutting conditions to get a drill under a sustainable criterion.

Keywords: Energy; Dry drilling; Composite; PA66 GF30

ANÁLISIS DE LA ENERGÍA REQUERIDA EN EL TALADRADO EN SECO DE ALTO RENDIMIENTO DE LA POLIAMIDA PA 66 GF30

En la actualidad, los materiales compuestos, en particular, los de matriz orgánica reforzada con fibra de vidrio, como es la poliamida PA 66 GF30, están siendo objeto de atención debido a su importancia industrial, usado como sustituto de metales, madera o vidrio. Sin embargo, los aspectos relacionados con la sostenibilidad como la energía necesaria durante el taladrado no han sido considerados, ni tampoco bajo condiciones de alto rendimiento. Este trabajo presenta un estudio experimental sobre el efecto de diferentes parámetros en el cálculo de la energía durante el taladrado en seco de alto rendimiento de PA 66 GF30. Así, se analizan brocas bajo diversas condiciones de corte, de alto rendimiento. Los materiales de las brocas son de acero rápido sin recubrimiento, WC con recubrimiento y WC con punta de diamante. En los ensayos, la energía se ha calculado por medio de fuerzas de avance y los momentos, a partir de la toma de datos a través de un dinamómetro piezoeléctrico. Los resultados proporcionan información sobre la influencia de algunos parámetros de corte, y muy especialmente el efecto del par, que resulta determinante. Algunas de las conclusiones obtenidas permiten acotar condiciones para obtener taladros a menor coste desde una perspectiva sostenible.

Palabras clave: Energía; Taladrado en seco; Materiales compuestos; PA66 GF30

Correspondencia: rdomingo@ind.uned.es

1. Introducción

En la actualidad, los materiales compuestos, en particular, los de matriz orgánica reforzada con fibra de vidrio (GF, *Glass Fiber*) como es el caso del polímero termoplástico, poliamida PA66, reforzado en un 30% con fibra de vidrio (PA66 GF30), están siendo objeto de atención debido a su importancia industrial, usado como sustituto de metales, madera o vidrio. A causa de sus buenas propiedades mecánicas y térmicas se han realizado estudios que llevan a un mayor conocimiento del comportamiento de este material durante los procesos de fabricación. Así Gaitonde et al. (2009) y Davim et al. (2009) analizan la maquinabilidad de este material, considerando el proceso de torneado. A pesar de que las operaciones de taladrado son esenciales para un buen montaje de piezas, y como paso previo a una operación de remachado, no hay evidencias del comportamiento de este material en esta situación, salvo la rugosidad superficial (Gaitonde et al., 2012a) o la calidad del agujero (Gaitonde et al., 2012b). obtenidas con un determinado tipo de broca.

Además, la preocupación por el medio ambiente ha llevado a estudios sobre la incidencia de los procesos de fabricación y sus posibles modificaciones con el objeto de que sean más respetuosos con el entorno (Aguado, Álvarez y Domingo, 2012). Esto no ha sido una excepción en los procesos de mecanizado, para los que se está investigando alternativas más amigables con el medio ambiente (Pusavec, Krajnik y Kopac, 2010; Pusavec et al., 2010).

Sin embargo, los aspectos relacionados con la sostenibilidad como la energía necesaria durante el taladrado no han sido considerados, ni tampoco bajo condiciones de alto rendimiento. Este trabajo presenta un estudio experimental sobre el efecto de diferentes parámetros en el cálculo de la energía durante el taladrado en seco de alto rendimiento de la poliamida PA66 GF30. Así, se analizan brocas bajo diversas condiciones de corte, de alto rendimiento, que incluyen las convencionales de acero rápido sin recubrimiento y dos tipos de aceros cementados, en concreto de carburo de wolframio con recubrimiento y de carburo de wolframio con punta de diamante, con el objeto de analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones de corte.

2. Metodología

2.1 Procedimiento Experimental

El material utilizado es PA66 GF30, cuyas propiedades mecánicas y térmicas más significativas respecto a la poliamida PA66 –por tanto, sin reforzar- se muestran en la Tabla 1, de acuerdo a los datos facilitados por la empresa suministradora del material. Como se aprecia en ella, el refuerzo de fibra de vidrio ha mejorado algunas de estas propiedades, lo que facilita su uso en componentes estructurales.

Se han llevado a cabo ensayos de conformado por eliminación de material, ejecutando taladros con tres tipos de brocas de diferentes materiales y geometrías, una estándar de acero rápido (HSS – *High Speed Steel*), otra de carburo de wolframio con recubrimiento de TiAlN y una tercera también de carburo de wolframio pero con punta de la broca de diamante. En todos los ensayos se han empleado brocas de 6,3 mm de diámetro; las características principales, de tipo geométrico, de las brocas se exponen en la Tabla 2. Aunque estas brocas son diferentes en cuanto a su material y geometría, este tipo de comparaciones es habitual en la literatura (Nouari et al., 2003). Durante el taladrado en un Centro de Mecanizado Manga Tongtai TMV-510 con control Fanuc –con una velocidad de rotación de la broca (N) de 6000, 7000 y 8000 rpm y una velocidad de avance (F) de 300, 400 y 500 mm/min-, se ha empleado un dinamómetro piezoeléctrico Kistler 9257B con un

amplificador multicanal Kistler 5070A con el objetivo de tomar datos de las fuerzas de avance y de los momentos, y con ellos poder determinar la energía requerida con cada broca. El espesor de las pletinas empleadas alcanza los 6,5 mm y sus dimensiones son similares al dinamómetro usado para evitar influencias de un posible pandeo durante las medidas de las fuerzas y momentos. En la Figura 1 se muestra el montaje del dinamómetro durante la ejecución de un taladro.

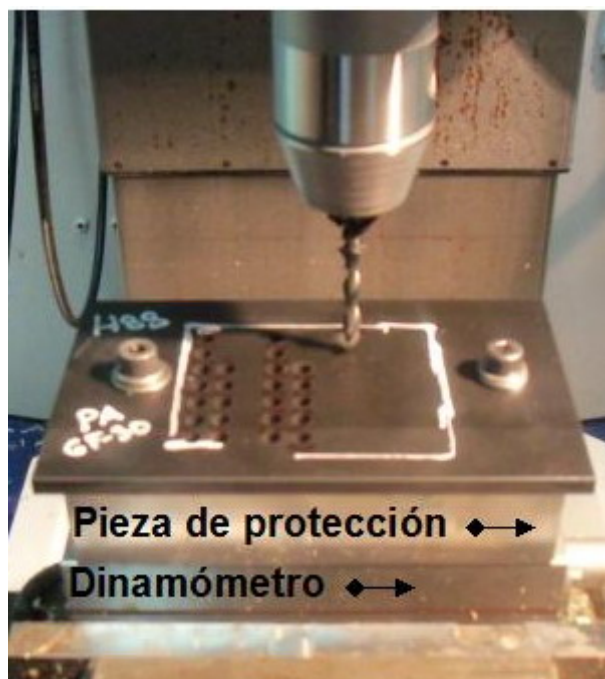
Tabla 1. Propiedades mecánicas y térmicas de PA66 GF30 y PA66

Propiedades	PA66 GF30	PA66
Densidad (kg/m ³)	1350	1140
Dureza Rockwell M	75	88
Resistencia a la tracción (MPa)	93,1	93
Módulo de tracción (Gpa)	4,65	3,55
Módulo de flexión (GPa)	4,48	3,24
Resistencia a la flexión (MPa)	145	135
Resistencia a la compresión (MPa)	124	62
Temperatura de fusión (°C)	260	260

Tabla 2. Características de las brocas

Código	Material	Recubrimiento	Ángulo de la punta	Ángulo de la hélice	Espesor del alma (mm)
B1	HSS	-	130°	35°	1,25
B2	WC	TiAlN	140°	27°	1,9
B3	WC	Punta de diamante	90°	35°	2

Figura 1. Montaje de la pieza de trabajo y el dinamómetro



2.2 Cálculo de la Energía

Como se ha indicado, las fuerzas y momentos se determinan experimentalmente, y para el cálculo de la energía se aplica la Ecuación (1),

$$E = \int_0^{\Delta t} F_t \cdot F \cdot dt + \int_0^{\Delta t} T \cdot N \cdot dt \quad (1)$$

Donde E es la energía, F_t la fuerza de avance, w la velocidad de avance de la broca en el eje Z, T el momento respecto al eje Z, N la velocidad de rotación de la herramienta y Δt el tiempo de duración del taladrado. Se aprecia, por tanto, que todos los valores de estos parámetros y variables son obtenidos experimentalmente.

2.3 Procedimiento Estadístico

Con el objeto de reducir el número de experimentos se ha aplicado la metodología de Taguchi (1990), en concreto el ordenamiento ortogonal L9, pues permite analizar hasta tres niveles por cada factor. Los factores y niveles se reflejan en la Tabla 3. Los resultados de las medias, así obtenidas, han sido sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) para determinar si los factores tienen una influencia significativa en los resultados, con un nivel de confianza del 95%; de esta manera, la aplicación del test de Fisher-Snedecor en el análisis ANOVA, determina que si el P-valor hallado, para un factor específico, es menor que 0,05, dicho factor es significativo (Spiegel, Schiller & Srinivasan, 2012). El software empleado ha sido Satgraphics.

Tabla 3. Factores y niveles del diseño de experimentos

Niveles	Factores N (rpm)	F (mm/min)	Tipo de broca
1	6000	300	B1
2	7000	400	B2
3	8000	500	B3

3. Energía Requerida durante el Proceso

Para cada factor y nivel, los ensayos se han repetido tres veces con el objeto de garantizar la fiabilidad de los resultados. Los datos de las medias de estos tres ensayos se encuentran en la Tabla 4, la cual refleja la energía requerida, bajo unas condiciones de corte fijadas, para la realización de un agujero.

Tabla 4. Resultados medios de la energía

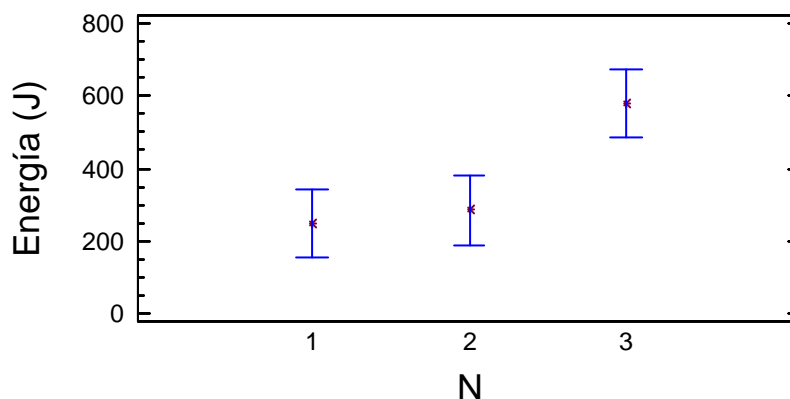
Nº de ensayo	N (rpm)	F (mm/min)	Broca	Energía (J)
1	6000	300	B1	259,13
2	6000	400	B2	332,99
3	6000	500	B3	151,97
4	7000	300	B2	336,26
5	7000	400	B3	282,99
6	7000	500	B1	234,03
7	8000	300	B3	1006,18
8	8000	400	B1	553,98
9	8000	500	B2	174,23

El análisis ANOVA (Tabla 5) desglosado en suma de cuadrados, grados de libertad, media cuadrática, F-ratio y P-valor, muestra como los tres factores considerados (*N*, *F* y tipo de broca) son significativos pues P-valor es menor que 0,05.

Tabla 5. Análisis de la varianza

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F-ratio	P-valor
N	589651,0	2	294826,0	15,74	0,0001
F	547480,0	2	273740,0	14,61	0,0001
Broca	184632,0	2	92317,6	4,93	0,0182
Error	374718,0	20	18735,9		
Total	1696480,0	26			

Figura 2. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% para el factor *N*



En las Figuras 2, 3 y 4 pueden observarse los valores medios para cada factor y nivel. La Figura 2 muestra cómo al aumentar la velocidad de rotación de la herramienta, lo hace también la energía, aunque no de manera proporcional, pues mientras la diferencia observada entre los factores 1 y 2, es decir entre 6000 y 7000 rpm, apenas es perceptible, entre los factores 2 y 3 (7000 y 8000 rpm) la energía alcanza un incremento excepcionalmente grande.

Respecto a la relación entre la velocidad de avance y la energía, en la Figura 3 puede apreciarse que un incremento de esta velocidad provoca un descenso del consumo de energía.

Finalmente, y en cuanto al tipo de broca, en la Figura 4 se observan importantes diferencias; en un principio, desde una perspectiva energética, parece que la broca de WC con recubrimiento de TiAlN es más conveniente. Sin embargo, resulta sorprendente, que la broca de WC con punta de diamante, diseñada para materiales compuestos y poliméricos necesite mucha más energía para ejecutar un taladro, más incluso que la broca de HSS que puede considerarse como estándar y no específica para este material.

Figura 3. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% para el factor *F*

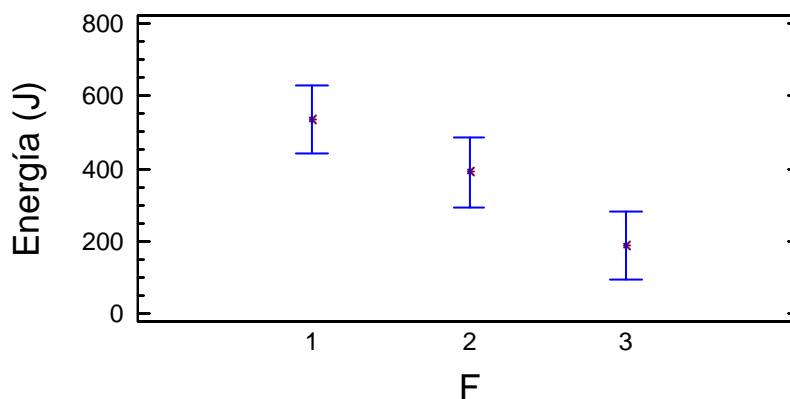
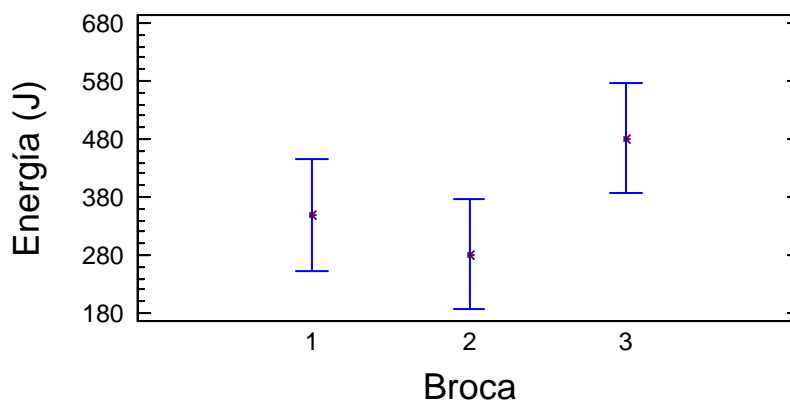


Figura 4. Valores medios e intervalos de confianza al 95,0% para el factor *Broca*



Al aplicar la Ecuación (1) se ha podido observar que la mayoría de la energía procede del efecto del momento, en un porcentaje superior al 90%. Esto es común a otros materiales durante el proceso de taladrado, como es el caso del PEEK GF30 (Domingo, García & Gómez, 2013), también material compuesto polimérico reforzado con fibra de vidrio. Como se ha visto, además el término de la Ecuación (1) asociado al momento, está vinculado con *N*, que ha resultado ser un factor muy influyente cuando se eleva a 8000 rpm. Este hecho puede explicar que la broca de WC con punta de diamante se encuentre diseñada con su ángulo en la punta de la broca de 90° para una mayor incidencia en el material, lo que provocaría la necesidad de una menor fuerza para realizar los agujeros –variable que incide en menor medida en la energía que el par-.

Merece una consideración especial la broca de WC con recubrimiento de TiAlN, en un principio diseñada de uso universal, y que con un ángulo de la punta de la broca elevado -de 140°- se obtengan resultados tan positivos. En un principio, su menor dureza frente a B2, podría suponer una menor deformación durante el proceso, y el recubrimiento contribuir a un menor rozamiento.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio experimental del proceso de taladrado en seco en la poliamida PA66 GF30, con el objeto fundamental de observar el comportamiento de diferentes brocas en cuanto al consumo de energía, como un primer paso hacia un análisis más amplio sobre un posible marco sostenible para este material, dado el uso industrial que se hace de él. Un análisis ANOVA ha determinado que los tres factores (*N*, *F* y tipo de broca) tienen un efecto significativo en los resultados con un nivel de confianza del 95,0%.

De los factores analizados, y en el rango de condiciones de corte seleccionadas, se ha encontrado que para un menor consumo energético es recomendable bajas velocidades de rotación de la broca, elevadas velocidades de avance y brocas de WC con recubrimiento de TiAlN.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, el diseño de la broca aún no está focalizado hacia aspectos amigables con el medio ambiente, y existe aún un amplio marco de estudio para combinar el rendimiento con la sostenibilidad.

5. Referencias

- Aguado, S., Álvarez, R. & Domingo, R. (2012). Model of efficient and sustainable improvements in a lean production system through processes of environmental innovation, *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2012.11.048
- Davim, J. P., Silva, L. R., Festas, A. & Abrão, A. M. (2009). Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing. *Materials & Design*, 30, 228–234. doi: 10.1016/j.matdes.2008.05.003
- Domingo, R., García, M. & R. Gómez, R. (2013). Influence of the torques on the calculation of the energy during the dry drilling of PEEK GF30, In *Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC)*, (1-8). Zaragoza.
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Campos Rubio, J., Abrão, A. M., Esteves Correia, A. E. & Davim, J. P. (2012a). Surface roughness analysis in high-speed drilling of unreinforced and reinforced polyamides. *Journal of Composite Materials*, 46, 2659-2673. doi: 10.1177/0021998311431640
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Campos Rubio, J. C., Leite, W. O., & Davim, J. P. (2012b). Experimental studies on hole quality and machinability characteristics in drilling of unreinforced and reinforced polyamides. *Journal of Composite Materials*. doi: 10.1177/0021998312467552
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Silva, L. R., Abrão, A. M. & Davim, J. P. (2009). Machinability study in microturning of PA66 GF30 polyamide with a PCD tool. *Materials and Manufacturing Processes*, 24, 1290–1296. doi:10.1080/10426910903130115
- Nouari, M., List, G., Girot, F. & Coupard, D. (2003). Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys. *Wear*, 255, 1359-1368. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00105-4
- Pusavec, F., Krajnik, P. & Kopac, J. (2010). Transition to sustainable production – Part I: Application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18, 174-184. doi:10.1016/j.jclepro.2009.08.010
- Pusavec, F., Kramar, D., Krajnik, P. & Kopac, J. (2010). Transition to sustainable production – Part II: evaluation of sustainable machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1211–1221. doi:10.1016/j.jclepro.2010.01.015

Spiegel, M., Schiller, J. & Srinivasan, R. A. (2012). *Probability and Statistics*, McGraw-Hill, 4ª edición.

Taguchi, G. (1990). *Introduction to quality engineering*. Asian Productivity Organization, Tokyo.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación obtenida a través del Proyecto DPI2011-27135 del Ministerio de Economía y Competitividad y del Proyecto ICF03 de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UNED.