

# Aportación al maquinado de los plásticos reforzados

Francisco Mata Cabrera

Departamento de Mecánica Aplicada, Universidad de Castilla-La Mancha  
Escuela Universitaria Politécnica de Almadén, 13400 Almadén, España  
Francisco.MCabrera@uclm.es

## RESUMEN

*Este artículo presenta un estudio experimental sobre la maquinabilidad de los plásticos reforzados con fibras de vidrio en el proceso de torneado, utilizando herramientas de diamante policristalino (PCD) y carburos cementados (K15).*

*El objetivo es evaluar la maquinabilidad de estos materiales considerando la presión específica de corte y el acabado de la pieza (rugosidad), en función del tipo de herramienta utilizado. Se propone además un nuevo índice de maquinabilidad para estos materiales.*

## PALABRAS CLAVE

Maquinabilidad, torneado, plásticos reforzados, fibra de vidrio.

## ABSTRACT

*This paper presents an experimental study about the machinability processes of glass fiber reinforced plastics using polycrystalline diamond cutting tools (PCD) and cemented carbide tools (K15).*

*The objective is to evaluate the lathe machinability of these materials considering specific cutting pressure and surface roughness according to the cutting tool type. Besides, new machinability index is being proposed.*

## KEYWORDS

Machinability, Turning, Glass Fiber, Reinforced Plastics.

## MATERIALES PLÁSTICOS REFORZADOS

Un plástico reforzado está constituido por una matriz de resina polimérica combinada con algún agente de refuerzo. La matriz polimérica permite la conformación del material, dándole cohesión, y las fibras de refuerzo confieren propiedades mecánicas como resistencia y rigidez. Las fibras de refuerzo más utilizadas en aplicaciones para ingeniería son las de vidrio y las de carbono, pudiendo recurrir para aplicaciones muy concretas a las fibras de boro o aramida.<sup>1</sup> Habitualmente, el material compuesto está formado por la matriz polimérica y un solo tipo de fibras, de diferente tamaño (cortas, continuas) y disposición (unidireccional, trenzada), siendo menos común la combinación de fibras de distinta naturaleza (vidrio y carbono).

La utilización de los materiales compuestos se ha incrementado en diversos campos de la ciencia y de la tecnología debido a su elevada rigidez y



resistencia específica, bajo peso, buena resistencia al desgaste y a la corrosión, estabilidad dimensional, excelente relación resistencia a fatiga/peso y propiedades direccionales, ofreciendo claras ventajas frente a los materiales convencionales como componentes resistentes o estructurales en un gran número de aplicaciones en los sectores de aeronáutica, automoción, construcción de máquinas y biomecánica. La mayor funcionalidad y la menor necesidad de mantenimiento son también dos razones adicionales para el desarrollo de estos materiales.

Las fibras de vidrio constituyen el refuerzo utilizado de forma mayoritaria porque reducen la tasa de expansión, incrementan el módulo de elasticidad, tienen características buenas como su alta rigidez, durabilidad y resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, y por su bajo precio.

Los materiales compuestos de matriz polimérica se utilizan ampliamente en diversas estructuras, como aeronaves, robots, máquinas y prótesis. Estas aplicaciones requieren de una alta calidad superficial, incluyendo la exactitud y la integridad superficial, utilizando para ello las herramientas y los parámetros de corte apropiados.

## MAQUINADO EN TORNO

La utilización de los materiales compuestos de matriz polimérica requiere el desarrollo de adecuados procesos de fabricación para obtener componentes mecánicos con características dimensionales rigurosas.

Los procesos de conformación primarios utilizados son numerosos (inyección, extrusión, bobinado...) y dependen tanto de la naturaleza termoplástica o termoestable del material como de la propia aplicación concreta (forma de la pieza, prestaciones deseadas, imperativos de producción, etc.). Por procesos de conformación secundarios entendemos las diferentes operaciones de maquinado (torneado, fresado, taladrado, etc.). El maquinado es un proceso de fabricación en el cual se utiliza una herramienta de corte para eliminar el exceso de material hasta conseguir la forma y dimensiones deseadas. En los últimos años, ha crecido el interés por el maquinado de los materiales compuestos mediante técnicas convencionales y los esfuerzos han ido encaminados a predecir las fuerzas de corte

observando los modos de fractura que causan la separación de la viruta.

El torneado es una de las operaciones de maquinado más utilizadas en la industria para producir una gran variedad de componentes de acuerdo con especificaciones estrictas de diseño. Las superficies de los acoplamientos mecánicos para diversas aplicaciones tribológicas se consiguen en la actualidad mediante operaciones de torneado.

El proceso de torneado de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras es diferente al de los metales y el cuerpo de conocimientos teórico y experimental de los metales no es aplicable directamente. Los materiales compuestos contienen dos fases, con propiedades mecánicas y térmicas muy diferenciadas, que se traducen en interacciones complejas entre la matriz y el refuerzo durante el proceso de arranque de material, de forma que condicionan la maquinabilidad de estos materiales, en relación con los materiales constituidos por una sola fase, como los metales.<sup>2,3,4</sup>

Las propiedades físicas y térmicas del material compuesto dependen del tipo, porcentaje y orientación de la fibra, de las propiedades de la matriz polimérica así como de la variabilidad de la propia matriz. Esta circunstancia tiene una gran influencia en el comportamiento tribológico de estos materiales. Los plásticos reforzados se comportan de forma extremadamente abrasiva cuando se someten a procesos de conformación por arranque de viruta. La elevada resistencia mecánica de las fibras puede originar un desgaste excesivo de la herramienta de corte y un gran daño en la matriz polimérica, ya que las fibras son arracadas de la matriz. El corte de los materiales plásticos reforzados con fibras se hace difícil debido a la delaminación del material compuesto y a la corta vida de la herramienta, de modo



Herramienta utilizada en los ensayos de FRP

que es preciso recurrir a herramientas elaboradas con materiales de alta resistencia al desgaste (carburos cementados y diamante policristalino). Es necesario, pues, establecer nuevas directrices para garantizar resultados satisfactorios del proceso de maquinado; en particular, relaciones experimentales que permitan asociar los parámetros funcionales del proceso de corte con las características dimensionales finales, ya que constituye un centro de especial interés para la industria.<sup>5, 6</sup> Se han realizado diferentes estudios sobre los parámetros de corte adecuados en la operación de torneado, de los que se puede concluir que no existe una referencia universal; antes bien, cada material, según el tipo y porcentaje de fibras de refuerzo, presenta unos valores de velocidad de corte y de velocidad de avance más apropiados para conseguir un acabado superficial óptimo y minimizar el desgaste de la herramienta.

Las propiedades del material tienen una influencia significativa en el desarrollo de las operaciones de maquinado y, junto con otras características del proceso, se incluyen genéricamente en el término “maquinabilidad”, el cual hace referencia a la relativa facilidad con la que el material puede ser trabajado, utilizando las herramientas y los parámetros funcionales de corte apropiados.

Se conocen diferentes criterios para evaluar la maquinabilidad; sin embargo, no existe un índice de maquinabilidad válido para todos los materiales, en particular en el caso de los materiales compuestos.<sup>7, 8, 9</sup> La rugosidad y la presión específica de corte son dos criterios importantes para evaluar la maquinabilidad de un material compuesto. La rugosidad se utiliza ampliamente como índice de calidad del producto y en muchos casos como requerimiento técnico de los componentes mecánicos. La presión específica de corte proporciona una indicación de la eficiencia del proceso.<sup>10, 11, 12</sup>

## PLAN EXPERIMENTAL

### Materiales y métodos

Para alcanzar el objetivo de este trabajo, se utilizaron en los ensayos tubos de plásticos reforzados con fibras de vidrio, concretamente matriz de poliéster reforzada con 65% de fibras de vidrio (Viapal VUP 9731). Los experimentos se llevaron a cabo en tubos de 113 mm de diámetro y 6 mm de

espesor, procesados según la técnica *hand lay-up* (fibras dispuestas longitudinalmente).

El conjunto de ensayos de maquinado se efectuó sin refrigeración y contemplando las 12 combinaciones entre 3 valores de la velocidad de corte y 4 valores de avance, de acuerdo con la tabla I. Se utilizó una profundidad de corte constante de 0.5 mm.

Tabla I. Parámetros de corte utilizados en los ensayos

f (mm/rev)	Vc (m/min)	Ensayo
0.05	100	1
0.1	100	2
0.15	100	3
0.2	100	4
0.05	200	5
0.1	200	6
0.15	200	7
0.2	200	8
0.05	400	9
0.1	400	10
0.15	400	11
0.2	400	12

Vc: Velocidad de corte

f: Avance (Feed rate)

Los ensayos de torneado se llevaron a cabo con un torno CNC (MHP KINGSBURY) de 18.7 kW de potencia y velocidad máxima de 4500 rpm, utilizando herramientas de diamante policristalino (TPUN 16 03 04-D-CD10-PCD) y herramientas de carburos cementados (TPGN 16 03 04 H13A).

Para fijar convenientemente las piezas tubulares durante el proceso de maquinado y evitar vibraciones, se diseñó un sistema específico de fijación consistente en una pieza maciza de aluminio a la que se une el

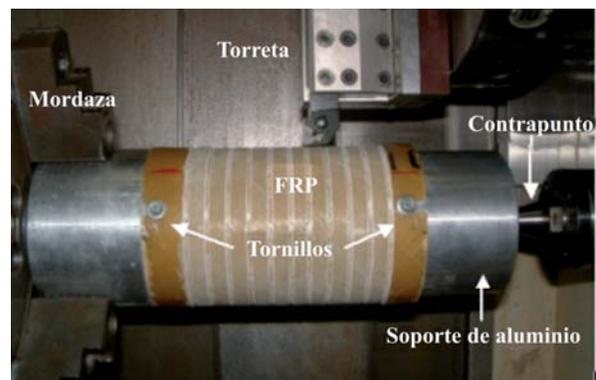


Fig. 1. Sistema de fijación de los tubos de plástico reforzado (FRP)

tubo en ensayo mediante 3 tornillos distribuidos a 120° en cada extremo. Esto permitió fijar el conjunto formado por la barra-tubo (conjunto rígido) entre la mordaza y el contrapunto, tal y como se puede ver en la figura 1.

La geometría de las herramientas es la siguiente: ángulo de ataque 6°, ángulo de posición 11°, ángulo de la arista de corte 91° y ángulo de inclinación 0°. Se utilizó un portaherramientas tipo TGPL 20 K16 (ISO).

Se empleó un dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9121 con interface RS-232 y software Dynoware Kistler® para la adquisición y monitorización de las fuerzas de corte (figura 2).

La rugosidad se evaluó (de acuerdo con la norma ISO 4287/1) con un rugosímetro *Hommeltester T1000*. Sobre cada pista maquinada se realizaron 5 medidas y utilizó, finalmente, el valor medio en los análisis posteriores (figura 3).

### Índice de Maquinabilidad

Con el fin de analizar la maquinabilidad de estos materiales, se calculó la presión específica de corte ( $K_s$ ) ( $N/mm^2$ ) a partir de la fuerza de corte ( $F_c$ ) utilizando la siguiente ecuación, recogida en la bibliografía:<sup>4,9</sup>

$$K_s = \frac{F_c}{S} = \frac{F_c}{f \cdot p} \quad (1)$$

Siendo,  $F_c$  la fuerza de corte en N,  $f$  el avance en mm/rev y  $p$  la profundidad de corte en mm.

La rugosidad se caracteriza normalmente por el parámetro  $R_a$  (rugosidad media aritmética) y será el valor utilizado en este trabajo.

Pues bien, se puede definir un nuevo índice de

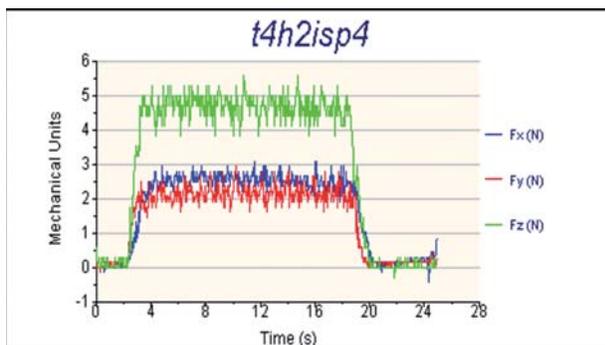


Fig. 2. Ejemplo de evolución de las fuerzas de corte



Fig. 3. Medida de la rugosidad

maquinabilidad (MI) a partir de la presión específica de corte y de la rugosidad mediante la siguiente ecuación:

$$MI = \left( \frac{1}{K_s} \cdot \alpha \right) \cdot \left( \frac{1}{R_a} \cdot \beta \right) \times 10^3 \quad (2)$$

Expresando  $K_s$  en  $N/mm^2$ ,  $R_a$  en mm, y siendo  $\alpha$  y  $\beta$  unos coeficientes de peso.

Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  se obtienen de modo que  $K_s$  y  $R_a$  tengan una contribución similar en el índice de maquinabilidad. La relación entre el valor medio de la presión específica de corte ( $K_s^*$ ) y el valor medio de las rugosidades ( $R_a^*$ ) permite determinar los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  para los resultados de este estudio, de modo que:

$$\alpha = 130$$

$$\beta = 1$$

En futuros trabajos se ampliará este índice de maquinabilidad, contemplando también otros parámetros como la potencia de corte o el desgaste de la herramienta.

## RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

### Análisis experimental

La evolución de la rugosidad en función del avance, para diferentes velocidades de corte, se puede observar en la figura 4. Como se puede apreciar, el valor de  $R_a$  aumenta con el avance y disminuye con la velocidad de corte. Se observa también que la utilización de la herramienta de diamante policristalino (PCD) conduce a valores

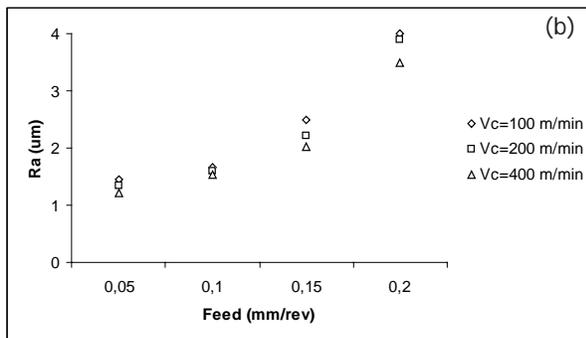
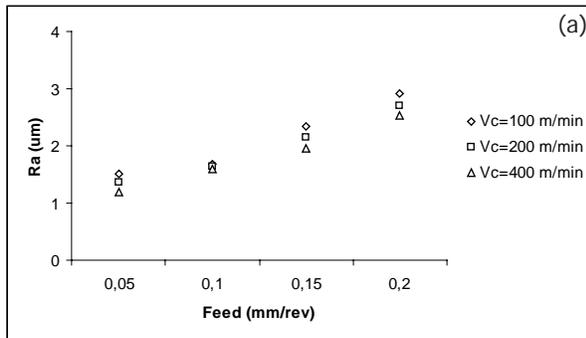


Fig. 4. Evolución de la rugosidad (Ra) en función del avance, para diferentes velocidades de cortes a) PCD, b) K15.

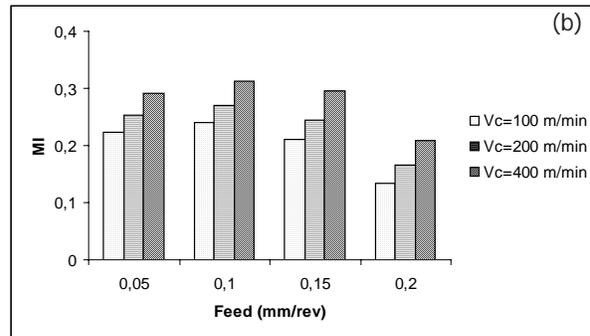
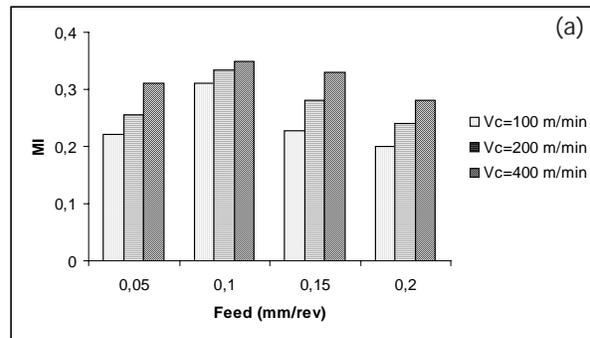


Fig. 6. Índice de maquinabilidad en función de los parámetros de corte: a) PCD, b) K15.

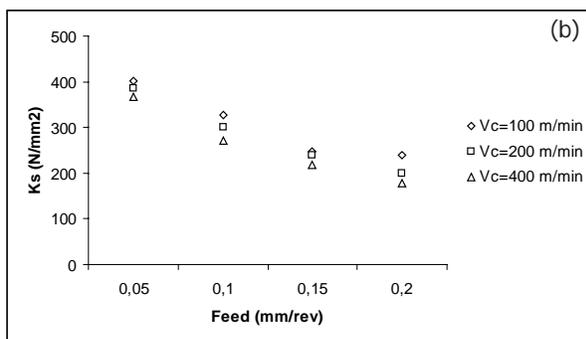
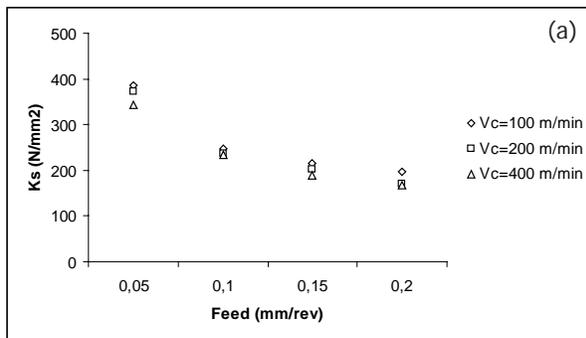


Fig. 5. Evolución de la presión específica de corte (Ks) con los parámetros de corte: a) PCD, b) K15.

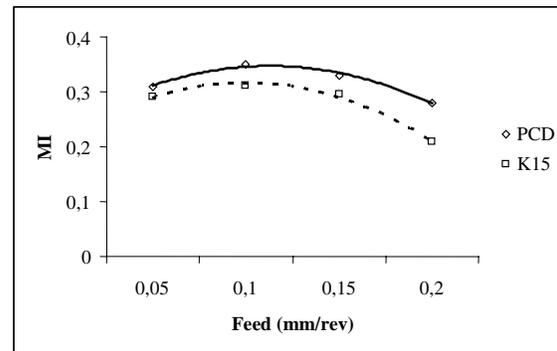


Fig. 7. Comparación de MI para las herramientas PCD y K15 en función del avance para una velocidad de corte,  $V_c=400$  m/min.

menores de rugosidad, particularmente para valores altos de avance.

La figura 5 muestra la evolución de la presión específica de corte (Ks) con los parámetros funcionales de corte. Se evidencia que Ks disminuye con el avance, para las diferentes velocidades de corte, y el efecto de la velocidad de corte es prácticamente insignificante. Además, se obtienen valores menores de Ks con la herramienta de diamante policristalino (PCD) que con la herramienta de carburo cementado (K15).

## Análisis de la maquinabilidad

La evolución del índice de maquinabilidad (MI) en función de los parámetros funcionales de corte se puede apreciar en la figura 6. Se observa que MI crece con la velocidad de corte, para los diferentes avances utilizados, y presenta un máximo para 0.1 mm/rev.

La figura 7 presenta una comparación del índice de maquinabilidad para los dos tipos de herramienta estudiados. Se aprecia como la herramienta de diamante policristalino (PCD) proporciona un mayor índice de maquinabilidad MI (valor medio de  $MI^* = 0.28$ ) en comparación con la herramienta de carburo cementado (K15) (valor medio de  $MI^* = 0.23$ ). En consecuencia, la herramienta de diamante policristalino mejora la maquinabilidad de los plásticos reforzados.

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados de este estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- 1) La utilización de la herramienta de diamante policristalino permite obtener valores menores de rugosidad y de presión específica de corte
- 2) La herramienta de diamante policristalino proporciona un índice de maquinabilidad mayor, lo que se traduce en una ventaja técnica importante, frente a la herramienta de carburo cementado
- 3) Se ha obtenido un valor máximo del índice de maquinabilidad (MI) para la pareja óptima de parámetros de corte ( $V_c=400$  m/min,  $f= 0.1$  mm/rev).

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo de investigación se ha desarrollado en los laboratorios del Departamento de Engenharia Mecânica de la Universidade de Aveiro (Portugal) y fue presentado en el XVI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, celebrado en diciembre de 2004 en León (España), incluyéndose en las Actas: "Anales de Ingeniería Mecánica, V.4"

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Krishan, K., "Composite materials. Science and engineering", Springer, pp. 133-163, (1998).
2. El-Sonbaty, U.A. Khashaba, T. Machaly, "Factors affecting the machinability of GFR/epoxy

- composites", Composite structures, Vol. 63, pp. 329-338, (2004).
3. Krishnamurthy, R., Santhanakrishnan, G., Malhotra, S.K., "Machining of Polymeric composites", Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium, ASM Materials Week, Chicago, Illinois, pp. 139-148, (1992).
4. M. P. Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Process and Systems", Prentice Hall Ed., pp. 637-639, (1996).
5. Lee, B.Y., Tarn, Y.S., Lii, H.R., "An Investigation of Modelling of the Machining Database in Turning Operations", Journal of Materials Processing Technology, Vol.105, pp.1-6, (2000).
6. M.V. Ribeiro, N.L. Coppini, "An applied database system for the optimisation of cutting conditions and tool selection", Journal of Material Processing Technology, Vol 92-93, pp. 371-374, (1999).
7. Takeyama, H., Iijima, N., "Machinability of glassfiber reinforced plastics and applications of ultrasonic machining", Annals CIRP, Vol. 37, pp. 93-96, (1998).
8. N. Bhatnagar, N. Ramakrishnan, N.K. Naik, "On the machining of fiber reinforce plastics (FRP) composite laminates", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 35, No 5, pp. 701-716, (1995)
9. G. Boothroy, W. Knight, "Fundamentals of Machining and Machine Tools", Marcel Dekker, New York, pp.121-124, (1989)
10. G. Spur, U.E. Wunsch, "Turning of Fiber-Reinforced Plastics", Manuf. Rev. 1 (2), pp. 124-129, (1988).
11. Kopac, J., Bahor, M., "Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product", Journal of Materials Processing Technology, Vols. 92-93, pp. 381-387, (1999).
12. G. Santhanakrishnan, R. Krishnamurthy, S.K.Malhotra, "Machinability Characteristics of Fibre Reinforced Plastics Composites", Journal of Mechanical Working Technology Vol. 17 pp.195-204, (1988).