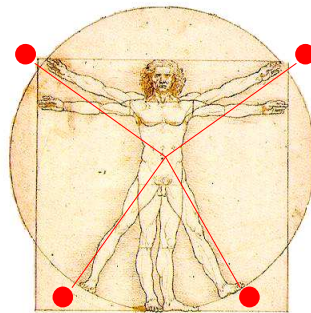


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

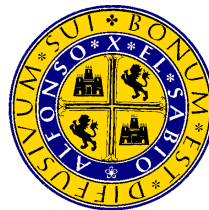
VOLUMEN IX. AÑO 2011

SEPARATA



MECANIZADO DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ
TERMOPLÁSTICA. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE PASADA
EN LAS FUERZAS DE CORTE Y EL ACABADO SUPERFICIAL

Francisco Mata Cabrera, Joao Paulo Davim



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Francisco Mata Cabrera, Joao Paulo Davim
Noviembre, 2011.

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECPRO11_001.pdf

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

Tecnol@ y desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol. IX. 2011

MECANIZADO DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE PASADA EN LAS FUERZAS DE CORTE Y EL ACABADO SUPERFICIAL

Francisco Mata Cabrera^a, Joao Paulo Davim^b

^{a)} Dr. Ingeniero Industrial, Departamento de Mecánica Aplicada, Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, Plaza Manuel Meca, 1, 13400, Almadén, Ciudad Real, Tf. 926-264007, Email: francisco.mcabrera@uclm.es

^{b)} Dr. Ingeniero Mecánico, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Aveiro, Campus Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, Email: pdavim@mec.ua.pt

RESUMEN:

En este trabajo se estudia la influencia de la profundidad de pasada en las fuerzas de corte y el acabado superficial, cuando se mecanizan diversos materiales de matriz termoplástica. Se demuestra cómo los mejores resultados (menores fuerzas y menor rugosidad) se consiguen con profundidades de corte bajas.

PALABRAS CLAVE: Materiales compuestos, Parámetros de corte, PCD.

ABSTRACT:

In this work the influence of depth of cut on cutting forces and surface finish is studied, in case of machining thermoplastic composite materials. There is demonstrated that the best results (minor forces and minor roughness) are obtained when low depth of cut is used.

KEY-WORDS: *Composite materials, Cutting parameters, PCD*

SUMARIO: 1. Introducción. 2. Materiales y métodos. 3. Resultados y discusión. 4. Conclusiones y continuidad de la investigación. 5. Referencias bibliográficas

SUMMARY: *1. Introduction. 2. Materials and methods. 3. Results and discussion. 4. Conclusions and continuity of the research 5. Bibliographical references*

1. Introducción.

Las propiedades del material tienen una influencia significativa en el desarrollo de las operaciones de mecanizado y, junto con otras características del proceso, se incluyen genéricamente en el término “maquinabilidad”. La maquinabilidad hace referencia a la relativa facilidad con la que el material

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECPRO11_001.pdf

puede ser mecanizado, utilizando las herramientas y los parámetros funcionales de corte apropiados (Groover, 1996).

La Figura 1 muestra los diferentes factores que afectan a la maquinabilidad de los materiales; en particular, los referentes a los parámetros funcionales de corte, a las propiedades del material y a la herramienta de corte.

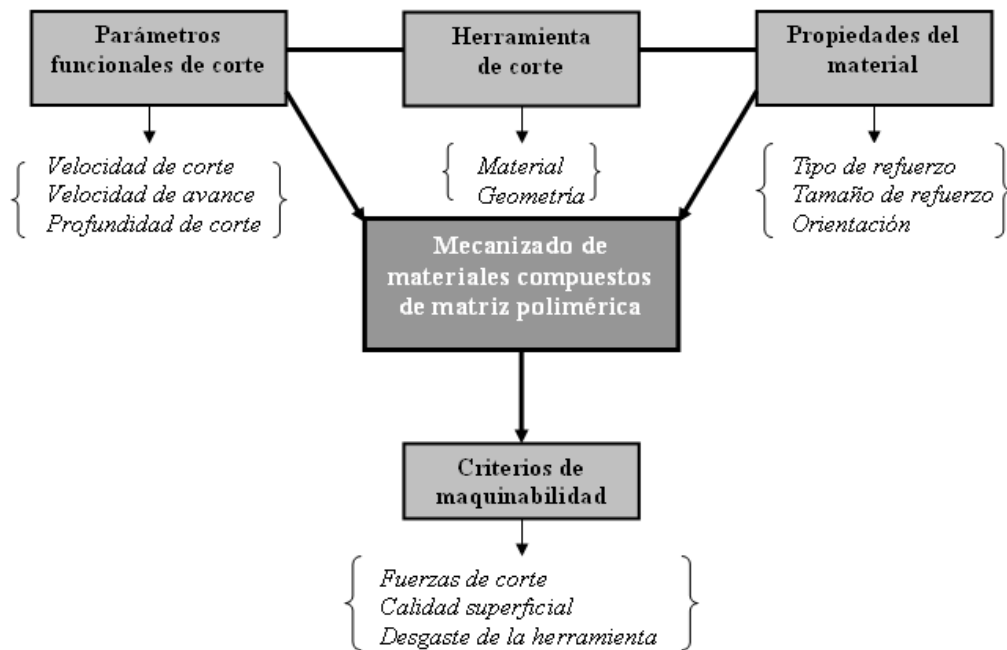


Figura 1. Factores que afectan a la maquinabilidad
(Fuente: Elaboración propia)

Diversas investigaciones han abordado el estudio de la maquinabilidad de los materiales plásticos de naturaleza termoestable reforzados con fibras. An et al. (1997) estudiaron algunas características del proceso de corte, prestando especial atención a la influencia del material y de la geometría de la herramienta. Ferreira et al. (2001) analizaron diferentes aspectos de la maquinabilidad en el torneado de materiales compuestos reforzados con fibras de carbono.

Hocheng y Tsao (2005 y 2006) desarrollaron series ensayos en materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de carbono, observaron las características de la viruta y evaluaron la maquinabilidad en función de la dirección de las fibras y de las condiciones de corte. Observaron que la componente de la fuerza de corte paralela a las fibras era menor que la componente perpendicular, circunstancia que explicaron recurriendo al modelo de Koplev (1980).

Chang (2006) realizó un estudio de la maquinabilidad de los plásticos reforzados con fibras de vidrio utilizando herramientas de carburo cementado, y desarrolló modelos de predicción de las fuerzas de corte.

Al hablar de parámetros funcionales de corte nos referimos a la selección de la velocidad de corte, la velocidad de avance y la profundidad de corte. Es importante también considerar la necesidad o no y la selección adecuada, en su caso, del fluido de corte.

Se han realizado diferentes estudios sobre los parámetros de corte adecuados en la operación de torneado (Yang y Tarng., 1998; El-Sonbaty et al., 2004; Varatharajan et al., 2006), 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 velocidad de avance más apropiados para conseguir un acabado superficial óptimo y minimizar el desgaste de la herramienta.

Es necesario, pues, establecer nuevas directrices para garantizar resultados satisfactorios del proceso de mecanizado (Eriksen, 1999); 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 (Lee et al., 2000).

La aplicación de fluido de corte durante el proceso de torneado puede originar absorción en la matriz polimérica y producir alteraciones dimensionales de las piezas y modificación de sus propiedades mecánicas. En consecuencia, el proceso de mecanizado se debe desarrollar sin refrigeración. Esta circunstancia permite, además, trabajar en una línea de gran interés en la actualidad: el mecanizado en seco o ecológico (Sreejith et al., 2000).

Mata y Davim (2004) han estudiado la influencia de la velocidad de corte y de la velocidad de avance en la rugosidad y en las fuerzas de corte, en procesos de torneado de materiales termoplásticos reforzados con fibras de vidrio y de carbono. En general, se consiguen mejores acabados y buenos resultados en cuanto a fuerzas de mecanizado trabajando con avances bajos (0.05-0.1 mm/rev) y velocidades de corte medias (100 m/min), lo que permite dar respuesta a las especificaciones técnicas en numerosas aplicaciones.

Pues bien, en este trabajo, se trata de analizar experimentalmente la influencia de la profundidad de pasada sobre las fuerzas de corte y el acabado superficial en este tipo de materiales compuestos de matriz polimérica.

Los resultados que a continuación se presentan forman parte de una amplia investigación tendente a la caracterización de los procesos de mecanizado de los materiales compuestos, llevada a cabo por los autores durante los últimos años.

2. Materiales y métodos.

2.1. Materiales ensayados.

Para realizar este trabajo de investigación sobre el mecanizado de materiales compuestos, se han utilizado materiales compuestos de matriz polimérica termoplástica, en presentación natural (sin refuerzo) o reforzados con porcentajes fijos de fibras de vidrio o de carbono. En concreto, los materiales compuestos de matriz polimérica ensayados son los siguientes:

- A) Poli (éter-éter-cetona) (PEEK)
- B) Poli (éter-éter-cetona) reforzada con 30 % de fibras de carbono (PEEK CF 30)
- C) Poliamida (PA 6)
- D) Poliamida reforzada con 30 % de fibras de vidrio (PA 66-GF30)

Tanto el PEEK natural como el PEEK CF30, reforzado con fibras de carbono, son materiales avanzados de altas prestaciones obtenidos a partir de resina de poli (éter-éter-cetona). La estructura semicristalina de estos materiales muestra una combinación única de propiedades mecánicas avanzadas, resistencia a altas temperaturas y excelente resistencia química, permitiendo que tengan numerosas e interesantes aplicaciones en la ingeniería.

Merecen ser destacadas las siguientes características:

- temperatura máxima de servicio elevada (250 ° C en continuo y 310 ° C en periodos cortos)
- elevada resistencia mecánica a la fluencia y dureza incluso a altas temperaturas
- excelente resistencia química y a hidrólisis
- excelente comportamiento al desgaste y a la abrasión (particularmente el PEEK CF30)
- muy buena estabilidad dimensional
- resistencia a la llama y escasa emisión de humo durante la combustión
- buenas propiedades eléctricas y aislantes eléctricos (excepto PEEK CF30)
- excelente resistencia a las radiaciones de alta energía

Estas cualidades les hacen muy adecuados para aplicaciones como la fabricación de elementos de máquinas, componentes de robótica y automoción, prótesis en biomecánica, además de la industria aeroespacial. A modo de ejemplo, se pueden citar: cojinetes, ejes, engranajes, elementos articulados de robots, paneles de aeronaves (fuselajes, alerones, etc.), etc.

Tanto la poliamida natural (PA 6) como reforzada con fibra de vidrio (PA 66-GF30) son materiales de uso más corriente que ofrecen también una combinación óptima de resistencia al desgaste, rigidez y tenacidad. Estas características, junto a su buena capacidad aislante y resistencia química permiten su aplicación sistemática en la fabricación de elementos mecánicos y de mantenimiento industrial (ruedas dentadas, casquillos, separadores, soportes, piezas estructurales, depósitos, etc.).

La Tabla 1 refleja las propiedades mecánicas y térmicas de los cuatro materiales ensayados. A diferencia de otros materiales poliméricos de naturaleza termoestable provistos de fibras largas, el grupo de materiales reforzados ensayados incorporan fibras cortas de pequeño diámetro, lo que permite considerarlos en cierta medida como materiales homogéneos. La Figura 2 muestra en esquema la distribución y orientación de las fibras en la matriz e indica las dimensiones medias de las mismas.

Propiedad	PEEK	PEEK CF30	PA 6	PA 66 GF30	Unidad
Módulo de elasticidad (E)	4400	7700	1400	3200	MPa
Dureza Rockwell	M105	M102	M85	M76	-
Resistencia al impacto	Sin fractura	35	Sin fractura	50	KJ/m ²
Temperatura de fusión	340	340	220	255	°C
Densidad	1.31	1.41	1.14	1.29	g/cm ³
Coefficiente de expansión térmica (<150°C)	50x10 ⁻⁶	25x10 ⁻⁶	90x10 ⁻⁶	50x10 ⁻⁶	m/m/k
Coefficiente de expansión térmica (>150°C)	110x10 ⁻⁶	55x10 ⁻⁶	105x10 ⁻⁶	60x10 ⁻⁶	m/m/k

Tabla 1- Propiedades de los materiales ensayados

(Fuente: ERTA®)

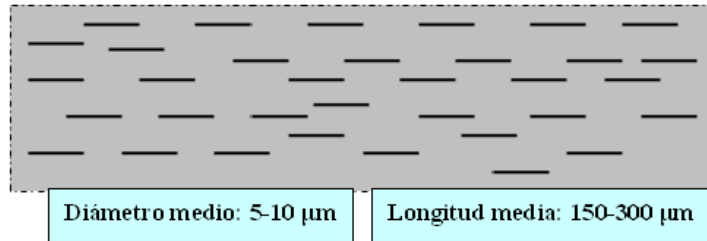


Figura 2. Dimensiones características de las fibras de refuerzo cortas
(Fuente: Elaboración propia)

Por tanto, se trata de dos familias de materiales poliméricos de matriz termoplástica, cuyo uso se encuentra en constante evolución y con prometedoras expectativas de cara al futuro en muchos sectores de aplicación. Es preciso, pues, diseñar adecuadamente procedimientos de mecanizado apropiados (proceso, herramienta, parámetros de corte) para dar respuesta a potenciales aplicaciones con requerimientos dimensionales y de acabado superficial. Las características especiales de estos materiales, en particular de aquellos que incorporan fibras de refuerzo, introducen complicaciones en los procesos de mecanizado, por lo que es imprescindible profundizar en el conocimiento a través de la experimentación científica.

2.2. Preparación de las probetas.

Se diseñaron probetas de 100 mm de longitud. El material base se adquirió en forma de redondos extruidos de 50 mm de diámetro, de modo que las dimensiones de las probetas son (Figura 3):

- longitud: 100 mm
- diámetro inicial: 50 mm

Las probetas se cortaron con sierra eléctrica de cinta a la longitud indicada, se refrentaron las caras planas, de modo que quedasen perfectamente paralelas y se practicaron sendos taladros para la fijación por contrapunto.

Este diseño de probetas permitió establecer 8 pistas de 10 mm, aptas para el mecanizado, y reservar 20 mm en la zona central, imprescindibles para el correcto desarrollo de la operación de torneado y evitar en todo momento el contacto de la punta de la herramienta con cualquier punto fijo de la máquina, etc. La anchura de las pistas se estableció en 10 mm, considerando esta dimensión mínima para poder registrar en tiempo suficiente los valores de las fuerzas de corte y efectuar después adecuadamente los ensayos de medida de rugosidad.

La Figura 4 muestra la identificación de las pistas y de la zona de seguridad.

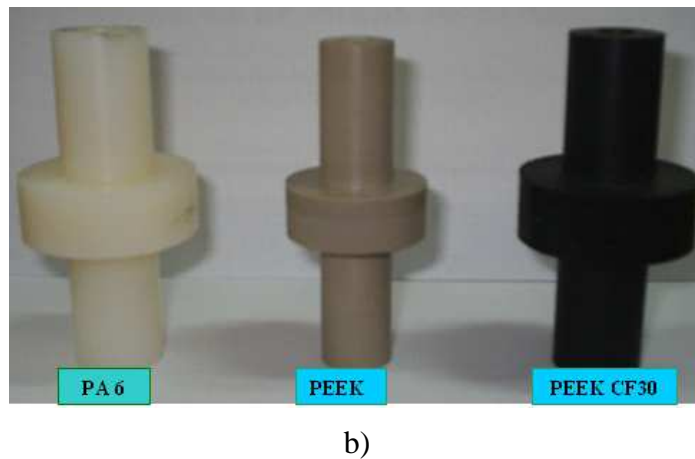
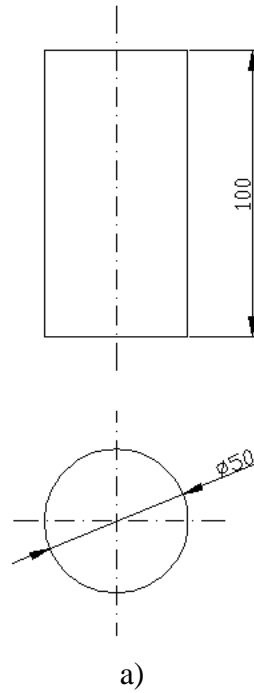


Figura 3: Probetas de trabajo: a) Dimensiones, b) Ejemplos de probetas ensayadas
(Fuente: Elaboración propia)



a)



b)

Figura 4 Planteamiento de ensayos sobre las probetas:
a) Esquema, b) Probeta tipo
(Fuente: Elaboración propia)

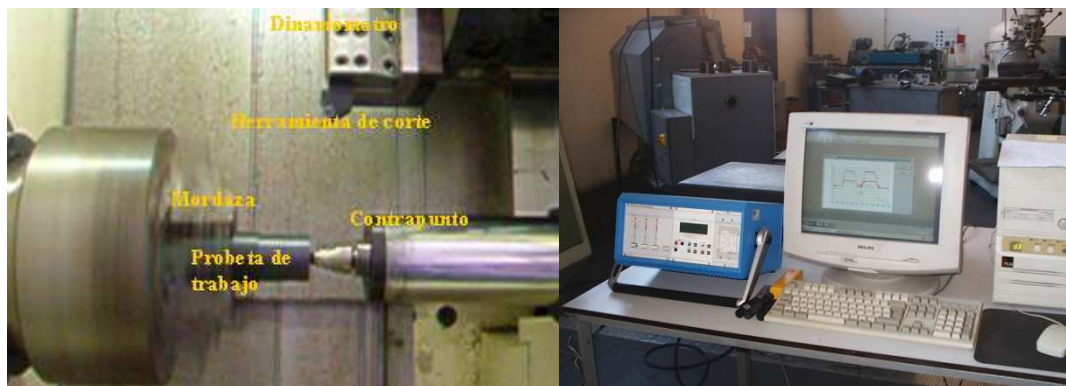
2.3. Máquinas y herramientas.

2.3.1 Torno CNC.

Para la realización de los ensayos experimentales de torneado se ha utilizado un torno CNC “Kingsbury® MHP 50” de 18 kW de potencia y velocidad máxima de 4500 rpm, que se encuentra instalado en el Laboratorio de Tecnología Mecánica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Aveiro (Figura 5).



a)



b)

c)

Figura 5 - Torno CNC “MHP Kingsbury®” utilizado en los ensayos:

a) Panel de control “FANUC”, b) Detalles de la experimentación,

c)Equipo monitorizado de adquisición de fuerzas de corte

(Fuente: Elaboración propia)

2.3.2. Herramientas de corte.

Se han utilizado herramientas de carburos cementados (K10) y de diamante policristalino (PCD). La Tabla 2 recoge la identificación y geometría de cada uno de los tipos de herramientas de corte utilizados en el trabajo experimental:

Material	Identificación ISO	Rompe virutas	$\gamma(^{\circ})$	$\chi(^{\circ})$	r_p (mm)	$\alpha(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$
PCD	DCMW 11T3 04FPDC10	No	7	0	0.4	93	0
K10	DCMW 11T3 04 H13A	No	7	0	0.4	93	0

PCD: diamante policristalino, K10: carburo cementado, γ : ángulo de ataque, χ : ángulo de posición, r_p : Radio de punta, λ : ángulo de inclinación, α : ángulo de arista de corte

Tabla 2 - Identificación y geometría de las herramientas utilizadas en los ensayos

(Fuente: Sandvik)

Se ha elegido el radio de punta de las herramientas de modo que se pueda conseguir un buen acabado superficial, en términos de rugosidad y precisión dimensional. Se ha seleccionado la geometría de la herramienta adecuada para obtener una buena calidad superficial y para mecanizar materiales compuestos con presencia de fibras de refuerzo.

La Figura 6 presenta los diferentes tipos de pastillas utilizados en los ensayos.

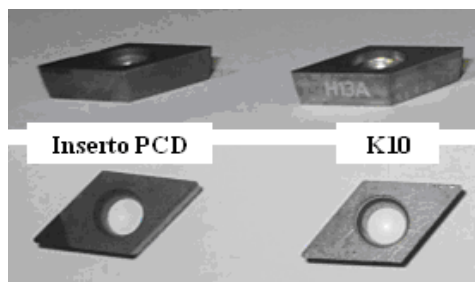


Figura 6. Herramientas utilizadas en los ensayos (Fuente: Elaboración propia)

Se ha utilizado un portaherramientas tipo SDJCL 2020 K11 (Sandvik), según se aprecia en la Figura 7.

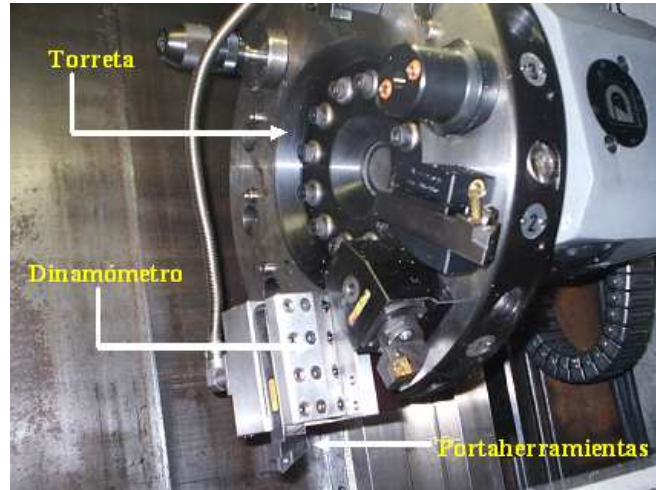


Figura 7. Detalle de fijación del portaherramientas utilizado en los ensayos
(Fuente: Elaboración propia)

2.4. Parámetros funcionales de corte.

Se varió la profundidad de pasada para verificar la influencia de este parámetro en los resultados finales, fijando las velocidades de corte y de avance, siendo las condiciones de corte las siguientes (Tabla 3):

Ensayo	V_c (m/min)	V_a (mm/rev)	P (mm)
1	100	0.1	0.5
2	100	0.1	1
3	100	0.1	3

Tabla 3. Condiciones de corte utilizadas en los ensayos

(Fuente: Elaboración propia)

2.5. Técnicas experimentales de caracterización.

2.5.1. Fuerzas de corte.

La medición y adquisición de las fuerzas de corte generadas en el proceso de torneado se ha efectuado a través de un dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9121 SN 646987, con amplificador de carga Kistler® 5019, interface RS-232 y software Dynoware Kistler® para la adquisición y monitorización de los datos (Figura 8).

La tasa de adquisición de datos fue de 20 Hz, con un tiempo de medición variable, dependiendo de los parámetros de proceso de cada ensayo, ya que la longitud de pasada era fija.

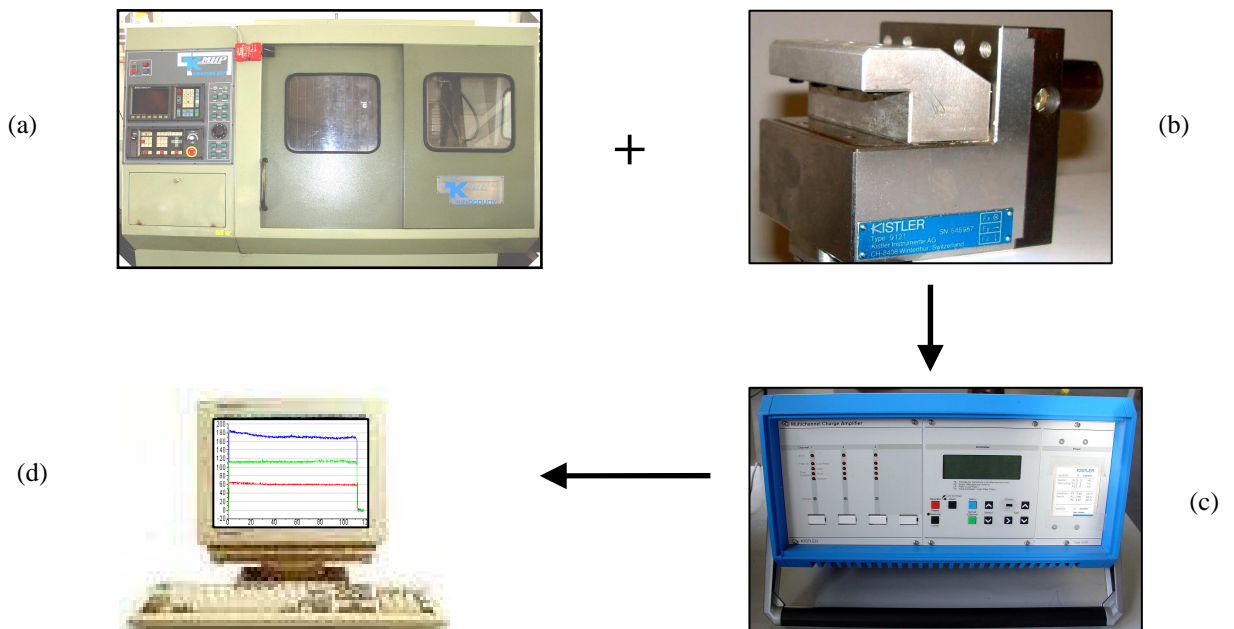


Figura 8. Equipamiento utilizado en la medición de las fuerzas de corte:
(a) Torno CNC “MHP Kingsbury” empleado en los ensayos, (b) Dinamómetro piezoeléctrico Kistler 9121, (c) Amplificador de carga Kistler 5019,
(d) Software “Dynoware Software Data Acquisition”
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 9 presenta un ejemplo de los resultados gráficos obtenidos en la determinación de las fuerzas de corte.

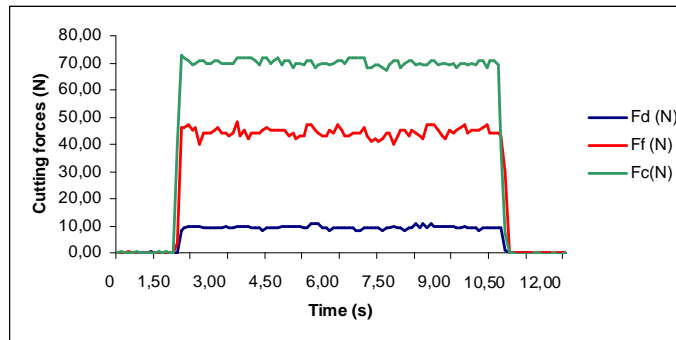


Figura 9 - Ejemplo de fuerzas de corte obtenidas en uno de los ensayos de torneado sobre el material PEEK CF30, con herramienta K10 y parámetros de corte:
 $V_c = 100$ m/min, $V_a = 0.1$ mm/rev, $P = 2$ mm
(Fuente: Dynoware Software)

2.5.2. Rugosidad superficial.

Junto con la evolución de las fuerzas de corte durante el mecanizado, el acabado superficial obtenido en la pieza mecanizada es un criterio importante de establecimiento de la maquinabilidad de un material.

La caracterización de las superficies torneadas se ha efectuado a través de la técnica más común de análisis de microgeometría de superficies, denominada rugosimetría. Los parámetros de rugosidad más interesantes son sin duda alguna la rugosidad media (R_a) y la amplitud máxima (R_t).

La medida de la rugosidad de las superficies mecanizadas se ha materializado con un rugosímetro Hommeltester – T 1000 (Figura 10).

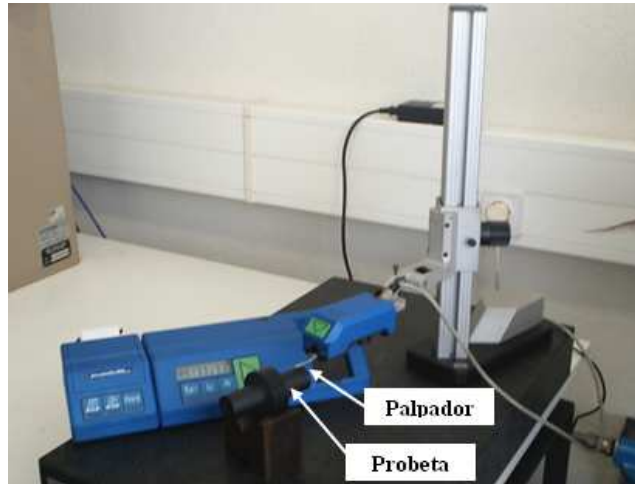


Figura 10 - Rugosímetro Hommeltester – T 1000 utilizado para caracterizar las superficies
(Fuente: Elaboración propia)

3. Resultados y discusión.

Se evaluará en lo sucesivo el efecto de la profundidad de pasada sobre los diferentes parámetros considerados (fuerzas de corte y rugosidad), con el fin de conocer su influencia sobre la maquinabilidad de estos dos grupos de materiales.

A partir de las tres componentes de la fuerza de corte registradas con el dinamómetro, se calculan la fuerza de mecanizado, la potencia de corte y la fuerza específica de corte, recurriendo a las siguientes ecuaciones (Groover, 1996):

$$F_m = \sqrt{F_c^2 + F_a^2 + F_p^2} \quad (\text{ec. 1})$$

$$P_c = F_c \times V_c \quad (\text{ec. 2})$$

$$K_s = \frac{F_c}{S} = \frac{F_c}{V_a \times P} \quad (\text{ec. 3})$$

siendo, F_c (N) la fuerza de corte, F_a (N) la fuerza de avance, F_p (N) la fuerza de penetración, V_c (m/min) la velocidad de corte, V_a (mm/rev) la velocidad de avance y P (mm) la profundidad de corte.

Los resultados obtenidos se grafican directamente en función de la profundidad de pasada, para observar de mejor las tendencias.

3.1. Poliamidas.

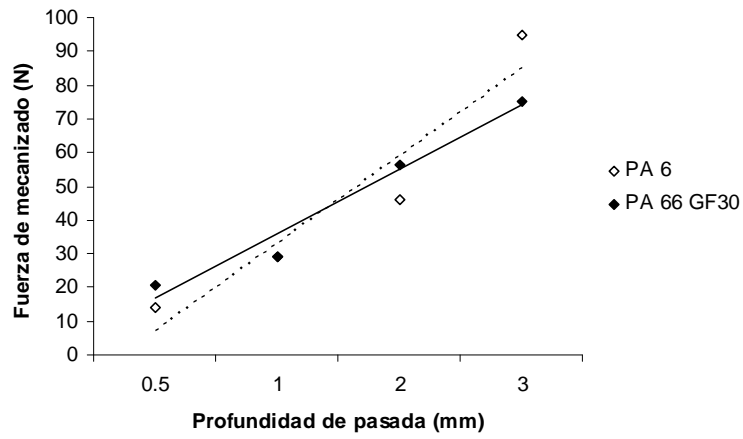
3.1.1. Fuerza y potencia de corte.

Se analiza en primer lugar el efecto de la profundidad de pasada sobre la fuerza de mecanizado, la potencia de corte y la fuerza específica de corte, para los dos tipos de herramientas, PCD y K10.

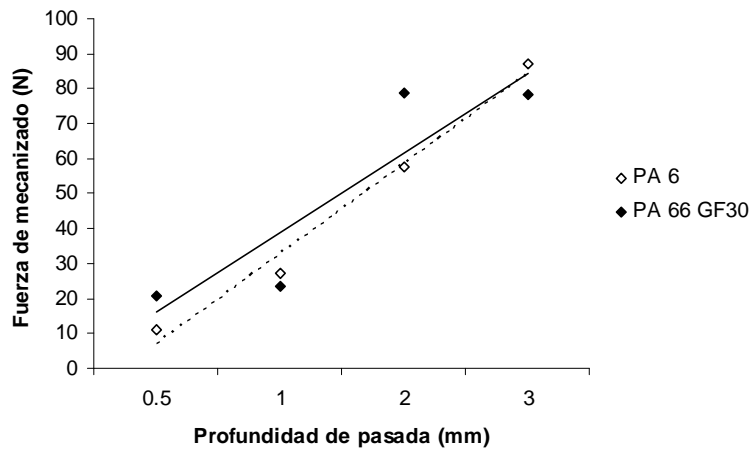
La Figura 11 muestra la evolución de la fuerza de mecanizado con la profundidad de pasada para los dos materiales ensayados y los dos tipos de herramientas utilizadas. Se observa cómo la fuerza de mecanizado aumenta lineal y significativamente con la profundidad de pasada en todos los casos.

La Figura 12 muestra la evolución de la potencia de corte con la profundidad de pasada para los dos materiales ensayados y los dos tipos de herramientas utilizadas. Como se puede comprobar, a medida que aumenta la profundidad de pasada aumenta la potencia de corte, de una forma lineal y significativa. Así pues, la mejor maquinabilidad se consigue para profundidades de pasada más bajas, para los dos materiales y los dos tipos de herramientas.

La Figura 13 muestra la evolución de la fuerza específica de corte con la profundidad de pasada para los dos materiales ensayados y los dos tipos de herramientas utilizadas. La fuerza específica de corte aumenta muy ligeramente a medida que aumenta la profundidad de pasada para el caso del material no reforzado. En el material reforzado, la pendiente de la línea de tendencia es negativa, de acuerdo con la definición de este parámetro (Ec. 3). En efecto, a medida que aumenta la profundidad de pasada (en el denominador), el valor de K_s debe descender.

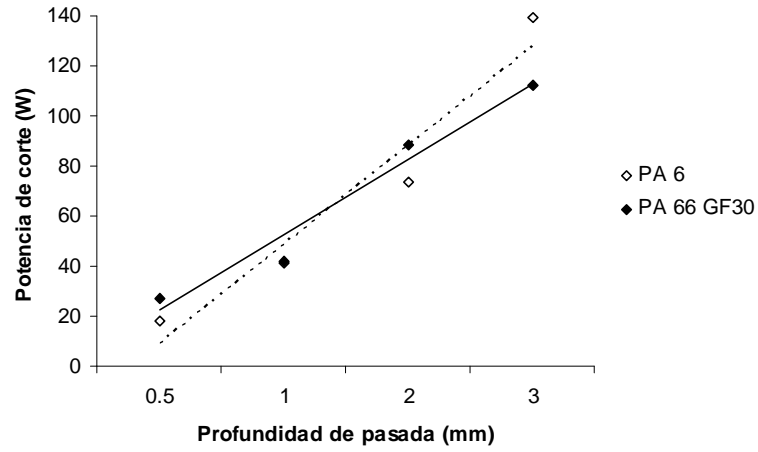


a)

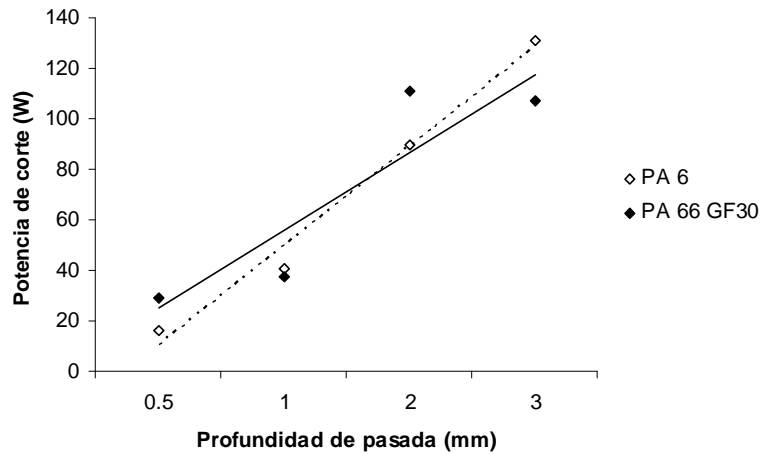


b)

Figura 11 - Evolución de la fuerza de mecanizado en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10
(Fuente: Elaboración propia)

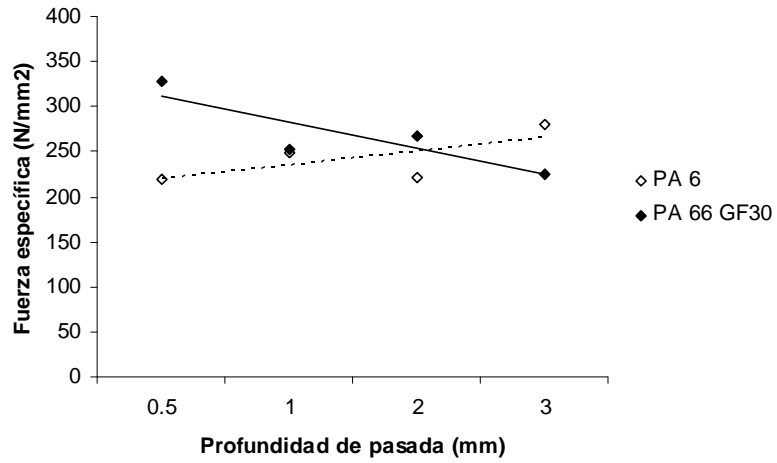


a)

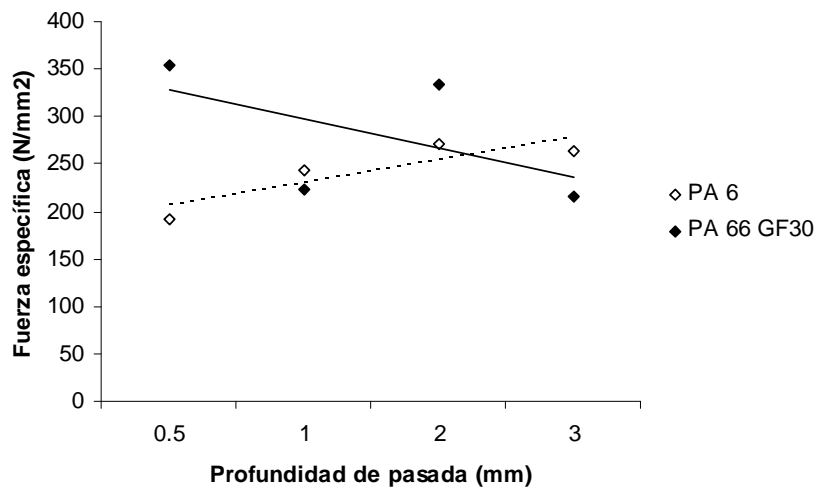


b)

Figura 12 - Evolución de la potencia de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10
(Fuente: Elaboración propia)



a)



b)

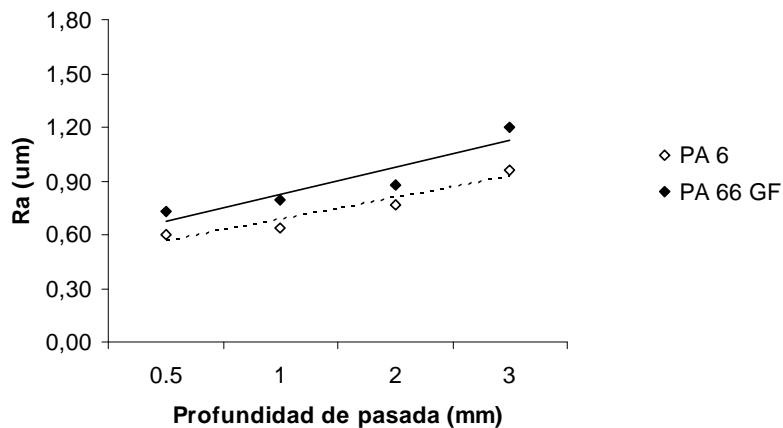
Figura 13 - Evolución de la fuerza específica de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10
(Fuente: Elaboración propia)

3.1.2. Acabado superficial.

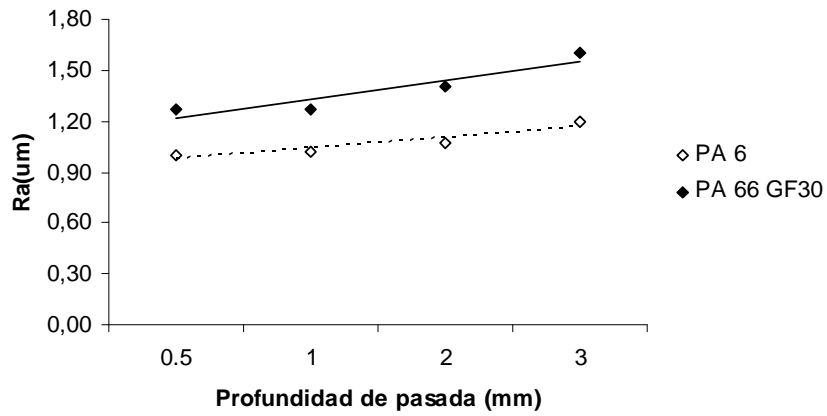
A continuación, se analiza el efecto de la profundidad de pasada sobre el acabado superficial, en particular sobre los parámetros de rugosidad seleccionados, Ra y Rt, para los dos tipos de herramientas, PCD y K10.

La Figura 14 muestra la evolución de Ra en función de la profundidad de pasada. Como se puede observar, Ra aumenta con la profundidad de pasada, apreciándose más el efecto a partir de P = 1 mm. Por lo demás, se evidencia el efecto de las fibras de refuerzo en el PA 66-GF30, que se traducen en mayor rugosidad con relación al material no reforzado.

La Figura 15 muestra la evolución del parámetro de rugosidad Rt en función de la profundidad de pasada. Se verifica que Rt aumenta con la profundidad de pasada, si bien el efecto sólo es especialmente significativo al pasar de P= 2 mm a P= 3 mm.



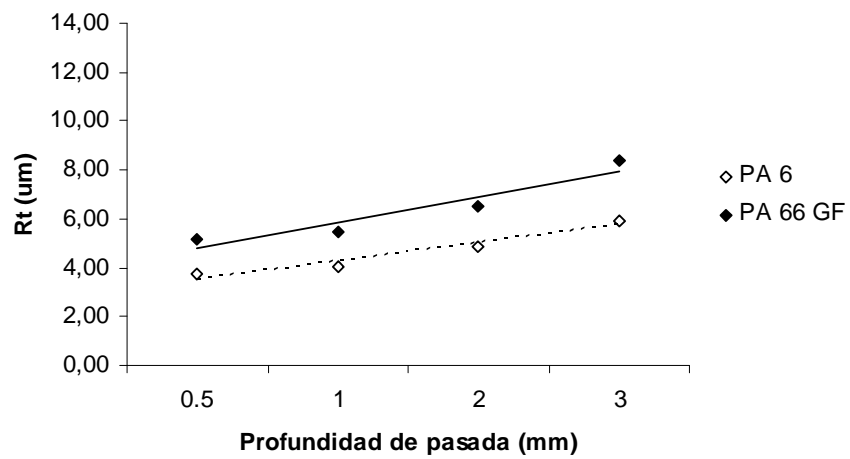
a)



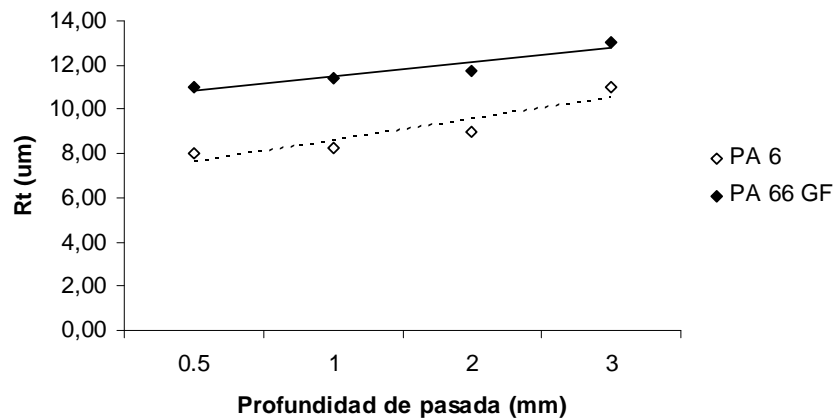
b)

Figura 14 - Evolución de Ra en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

(Fuente: Elaboración propia)



a)



b)

Figura 15 - Evolución de Rt en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10 (Fuente: Elaboración propia)

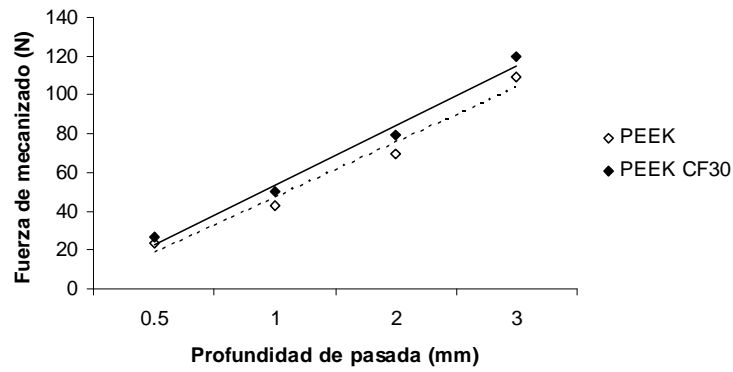
3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK).

3.2.1. Fuerza y potencia de corte.

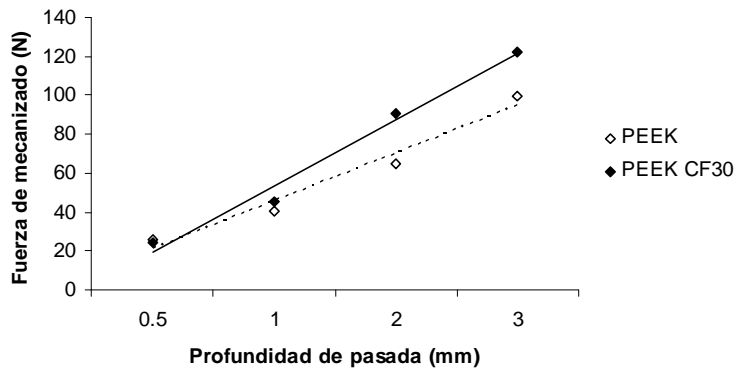
La Figura 16 muestra la evolución de la fuerza de mecanizado con la profundidad de pasada para los dos materiales ensayados y los dos tipos de herramientas utilizadas. Se observa cómo la fuerza de mecanizado aumenta lineal y significativamente con la profundidad de pasada en todos los casos.

La Figura 17 muestra la evolución de la potencia de corte con la profundidad de pasada para los dos materiales ensayados y los dos tipos de herramientas utilizadas. Como se puede comprobar, a medida que aumenta la profundidad de pasada aumenta la potencia de corte, de una forma lineal y significativa. En el caso de la herramienta PCD, los resultados son prácticamente coincidentes. Así

pues, la mejor maquinabilidad se consigue para profundidades de pasada más bajas, para los dos materiales y los dos tipos de herramientas.

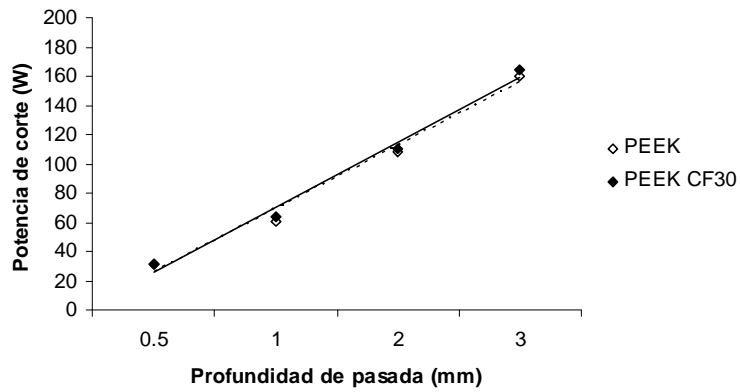


a)

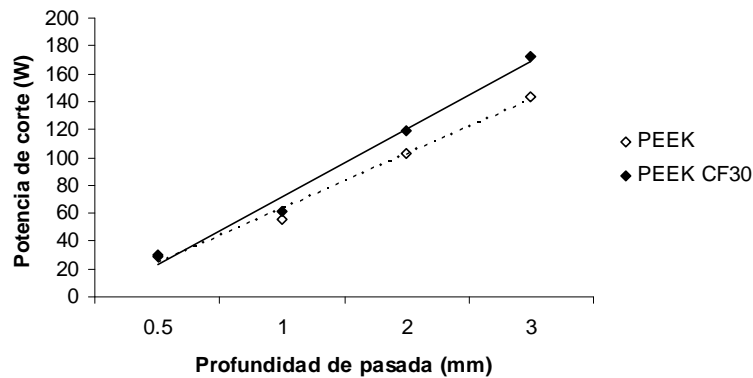


b)

Figura 16. Evolución de la fuerza de mecanizado en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10 (Fuente: Elaboración propia)



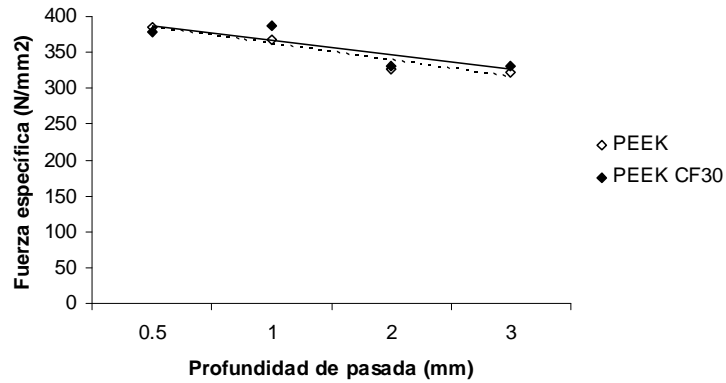
a)



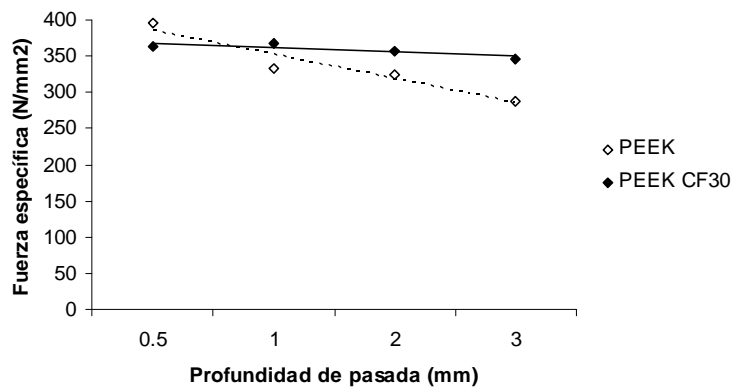
b)

Figura 17 - Evolución de la potencia de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 18 muestra la evolución de la presión específica de corte con la profundidad de pasada para los dos materiales ensayados y los dos tipos de herramientas utilizadas. La fuerza específica de corte disminuye ligeramente a medida que aumenta la profundidad de pasada en todos los casos analizados. Son válidos los mismos comentarios expresados anteriormente para las poliamidas.



a)

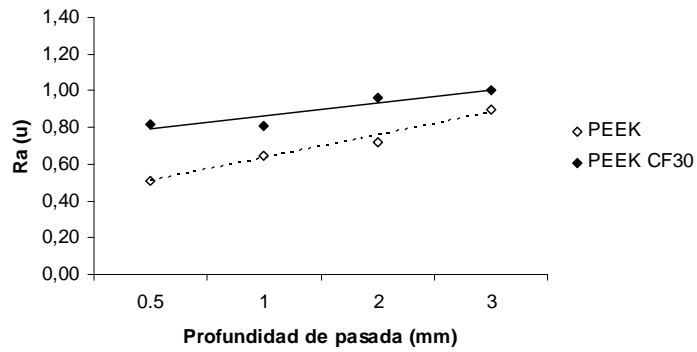


b)

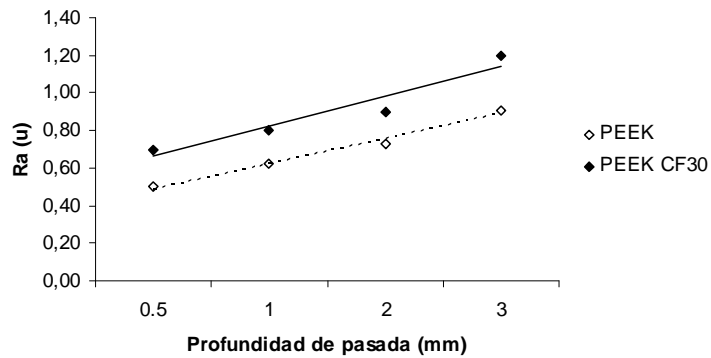
Figura 18 - Evolución de la fuerza específica de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10 (Fuente: Elaboración propia)

3.2.2. Acabado superficial

La Figura 19 muestra la evolución de Ra en función de la profundidad de pasada. Como se puede observar, Ra aumenta ligeramente con la profundidad de pasada. Por lo demás, se evidencia el efecto de las fibras de refuerzo en el PEEK CF30, que se traducen en mayor rugosidad con relación al material no reforzado.



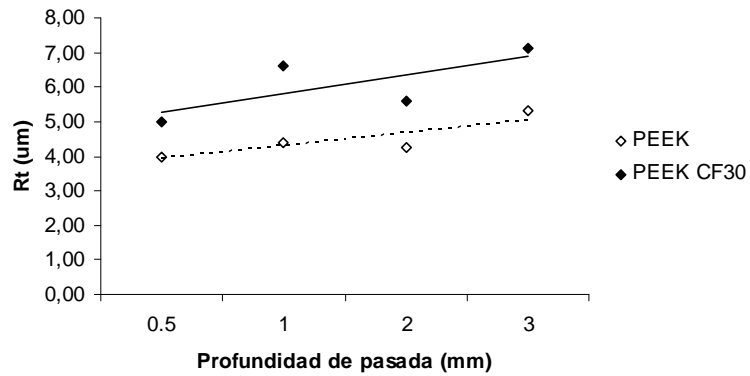
a)



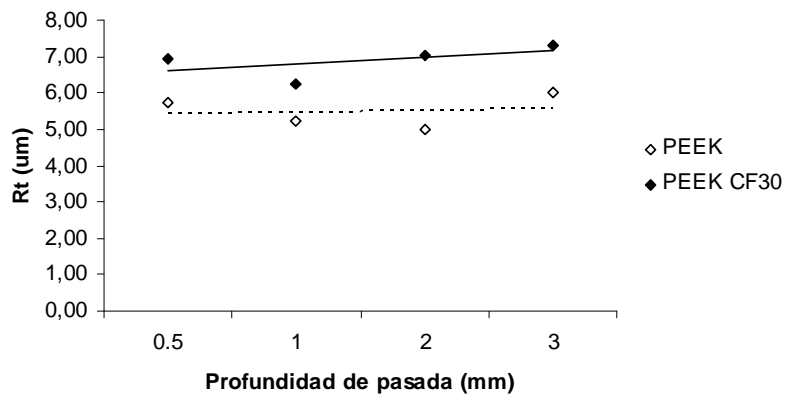
b)

Figura 19 - Evolución de Ra en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10 (Fuente: Elaboración propia)

La Figura 20 muestra la evolución del parámetro de rugosidad R_t en función de la profundidad de pasada. Se verifica que R_t aumenta poco con la profundidad de pasada, siendo sólo el efecto especialmente significativo al pasar de $P=2$ mm a $P=3$ mm en el caso de PCD. Para K10 el efecto es casi despreciable.



a)



b)

Figura 20 - Evolución de Rt en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10 (Fuente: Elaboración propia)

4. Conclusiones y continuidad de la investigación.

Se ha puesto de manifiesto la influencia de la profundidad de corte sobre las fuerzas de corte y el acabado superficial. Por término general, los mejores resultados (menores valores de fuerza y potencia de corte y menor rugosidad) se obtienen si se trabaja con profundidades bajas. Esta tendencia se evidencia para los cuatro materiales y los dos tipos de herramienta, aunque los valores difieren ligeramente, atendiendo en un caso a la presencia o no de las fibras de refuerzo y a la especificidad de la herramienta de diamante policristalino (PCD), que sin duda es muy adecuada para el mecanizado de materiales reforzados.

El desarrollo de modelos de predicción basados en los resultados experimentales de este trabajo constituye una línea de interés para dar continuidad a la investigación. Asimismo es posible ampliar la matriz de materiales y herramientas de corte, de forma que las conclusiones sean generalizables a un mayor número de situaciones.

5. Referencias bibliográficas.

An, S.O., Lee, E.S., Noh, S.L., (1997), "A study on the cutting characteristics of glass fiber reinforced plastics with respect to tool materials and geometries", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 68, pp. 60-67.

Chang, C.S., (2006), "Turning of glass-fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 180, pp. 117-129.

El-Sonbaty, U.A. Khashaba, T. Machaly, T. (2004), "Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites", *Composite Structures*, Vol. 63, pp. 329-338.

Eriksen, E., (1999), "Influence from production parameters on the surface roughness of a machined short fibre reinforced thermoplastic", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No 10, pp. 1661-1618.

Ferreira, J.R., Coppini, N.L., Miranda, G.W.A., (1999), "Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials", *Journal of Material Processing Technology*, Vol.92-93, pp. 135-140.

Groover, M.P., (1996), "Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Process and Systems", *Prentice Hall International Editions*.

Hocheng, H., Tsao, C.C., (2005), "The path towards delamination-free drilling of composite materials", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167 (2-3), pp. 251-264.

Hocheng, H., Tsao, C.C., (2006), "Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46 (12-13), pp. 1403-1416.

Koplev, A., (1980), "Cutting of CFRP with single edge tools", *3rd International Conference on composite Materials*, Paris.

Lee, B.Y., Tarng, Y.S., Lii, H.R., (2000), "An Investigation of Modelling of the Machining Database in Turning Operations", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.105, pp.1-6.

Mata, F., Davim, JP., (2004), "Turning of fiber reinforced plastics: experimental study of the evolution of the cutting forces and workpiece surface roughness", *VIII Congreso Nacional de Materiales*, España.

Sreejith, P.S., Krishnamurthy, R., Malhotra, S.K., Narayanasamy, K., (2000), "Evaluation of PCD tool performance during machining of carbon/phenolic ablative composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 104, pp.53-58.

Varatharajan, R., Malhotra, S.K., Vijayaraghavan, L., Krishnamurthy, R., (2006), "Mechanical and machining characteristics of GF/PP and GF/Polyester composites", *Materials Science and Engineering B*, Vol. 132, pp. 134-137.

Yang, W.H., Tarng, Y.S., (1998), "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84(1), pp. 122-129.