



**Francisco Mata  
Cabrera**

**Modelos físicos e estatísticos na maquinagem de  
compósitos de matriz termoplástica**

**Modelos físicos y estadísticos para la  
caracterización del mecanizado de los materiales  
compuestos de matriz termoplástica**

**DOCUMENTO  
DEFINITIVO**



**Francisco Mata  
Cabrera**

**Modelos físicos e estatísticos na maquinagem de  
compósitos de matriz termoplástica**

**Modelos físicos y estadísticos para la  
caracterización del mecanizado de los materiales  
compuestos de matriz termoplástica**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Joao Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabajo a mi padre, Raimundo, que siempre me ha dado fuerzas para terminarlo

## **o júri**

presidente

**Prof. Dr. José Pereira Costa Tavares**  
professor catedrático da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. Pedro José Nuñez López**  
professor titular de la Universidad de Castilla-La Mancha

**Prof. Dr. António Paulo Monteiro Baptista**  
professor associado com agregação da Universidade do Porto

**Prof. Dr. Francisco José Malheiro Queirós de Melo**  
professor associado da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. João Paulo Davim Tavares da Silva**  
professor auxiliar com agregação da Universidade de Aveiro (orientador)

**Prof. Dr. Antonio José Freire Mourao**  
professor auxiliar da Universidade Nova de Lisboa

**Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio**  
professor adjunto da Universidade Federal de Minas Gerais

## agradecimientos

A mi madre, Consuelo, y a mi hermano, Raimundo, por su apoyo y comprensión, por todo aquello que sólo ellos saben.

A mi tía, Inocenta, por su afecto.

A todos los míos, por la energía recibida.

Al Prof. Dr. Joao Paulo Davim, orientador, por su inestimable ayuda y apoyo incondicional en el desarrollo de toda la investigación.

A los Ms. Pedro Reis y Rosaria Cardoso, por su colaboración en el desarrollo del trabajo experimental.

A los Presidentes del Consejo Directivo del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidade de Aveiro, Profesores José Grácio y Jorge Ferreira, por permitirme trabajar como en casa.

Al Director de la Escuela Universitaria Politécnica de Almadén, D. Luis Mansilla, por permitirme compaginar mi actividad docente y de gestión con la realización de estancias de investigación en Portugal.

A Carlos, Fernando y Magín, claves en mis comienzos en la Universidad.

A Doroteo, por abrirme una puerta vocacional.

A Pedro, por sus sabios comentarios y sugerencias.

A los Vicerrectorados de Profesorado y de Relaciones Internacionales de la Universidad de Castilla-La Mancha, por financiar mis estancias de investigación.

A todos mis compañeros y alumnos de la Universidad de Castilla-La Mancha, por su paciencia y aliento.

*“Devenir”*

*La calle se estrecha  
hacia su fin  
y la acera  
por la que camino  
parece morir  
y perderse del todo.  
Mas, a cada paso,  
se aclara el enigma  
y la luz  
llena mis ojos:  
veo otra calle  
y otra acera.*

**Palabras clave**

poliamida, poli (éter-éter-cetona), maquinabilidad, modelo de corte, análisis de varianza, herramientas de diamante.

**resumen**

La presente Tesis Doctoral tiene como objetivos fundamentales estudiar la maquinabilidad y definir los modelos de corte de los materiales compuestos de matriz polimérica termoplástica.

Se han realizado ensayos de torneado sobre dos materiales pertenecientes a la familia de las poliamidas, en concreto la PA 6 y la PA 66-GF30, reforzada con 30% de fibras de vidrio, y sobre tres materiales pertenecientes a la familia de las poli (éter-éter-cetonas), el PEEK, el PEEK CF30, reforzado con 30% de fibras de carbono, y el PEEK GF30, reforzado con 30% de fibras de vidrio. Las aplicaciones más frecuentes de estos materiales son la industria aeroespacial, la biomecánica y la construcción de elementos de máquinas, principalmente. En buena parte de sus aplicaciones, es preciso conseguir superficies con un grado de calidad determinado, lo que exige realizar operaciones de mecanizado posteriores al conformado del material. Las poliamidas son materiales termoplásticos implantados a nivel industrial mientras que las poli (éter-éter-cetonas) reforzadas son materiales compuestos avanzados con enormes potencialidades de cara al futuro.

La mayor parte de las referencias sobre el mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica se centran en el estudio de los materiales termoestables, mientras que los termoplásticos constituyen un terreno abonado para la investigación, teniendo en cuenta el excelente conjunto de propiedades que exhiben.

El desarrollo experimental comprende los ensayos de corte ortogonal, realizados con dos tipos de herramientas, las pastillas de carburos cementados (K10) y los insertos de diamante policristalino (PCD), y planes de ensayos específicos para verificar ciertos efectos como la influencia de la profundidad de pasada o la geometría de la herramienta. Durante el proceso de torneado se registran de manera continua las fuerzas de corte, lo que permitirá, junto con la medida del espesor de viruta, definir el modelo físico de corte de estos materiales y establecer relaciones con respecto al modelo teórico de Merchant. La medida de la rugosidad permitirá también obtener resultados para analizar la maquinabilidad de estos materiales compuestos.

Se recurre a técnicas estadísticas, entre ellas el análisis de varianza, para completar el estudio del mecanizado, establecer modelos de predicción y, en todo caso, optimizar las condiciones de corte.

Sobre la base de la experimentación y de los posteriores análisis realizados, se pone de manifiesto el efecto de las fibras de refuerzo sobre la maquinabilidad de estos materiales compuestos, así como la influencia de la herramienta de corte en los resultados.

**keywords**

polyamide, polyétherétherketone (PEEK), machinability, cutting model, analysis of variance, diamond cutting tools.

**abstract**

The aims of the present research have to study the machinability and to define cutting models for thermoplastic composite materials.

Turning tests using polyamide PA 6, polyétherétherketone PEEK, composites PA 66-GF30 and PEEK GF30, reinforced with 30% of glass fibers and composite PEEK CF30, reinforced with 30% of carbon fibers were carried out. These materials are used in aerospace industry, biomechanics and machine elements.

In a great number of applications it is necessary to improve surfaces with a prefixed quality degree, therefore it is required to realize machining operations on the workpiece material.

Polyamides are thermoplastic materials used in the industry whereas polyétherétherketones are advanced compound materials with great potentials with a view to the future.

Most of the references on the machining of polymeric matrix composite materials consisted of studies of thermoestable materials, whereas the thermoplastic materials constitute an area whit interest for the investigation, bearing in mind the excellent set of properties that they exhibit.

The experimental procedure includes the orthogonal cutting tests, realized with two types of tools, the main cemented carbide (K10) and the polycrystalline diamond (PCD), and plans of specific tests to verify certain effects as the influence of the depth of cut or the tool geometry. During the turning process, cutting forces, chip thickness and surface ruoghness obtained in workpiece were measured. These results allows to define the physical cutting model and to establish relations with regard to the theoretical model of Merchant. The machinability is also studied from the experimental results.

Statistical thecniques, among them the analysis of variance, are used to complete the machining study, to stablish predictive models and to optimice the cutting parameters.

**palavras-chave****palavras-chave**

Poliamida, poli (éter-eter-cetona), ferramentas de diamante, maquinabilidade, modelos de corte, análise de variância

**resumo**

A presente investigação tem como objectivos fundamentais estudar a maquinabilidade e definir modelos de corte para os materiais compósitos de matriz termoplástica. Foram efectuados ensaios de corte ortogonal e de torneamento sobre poliamidas PA 6 e PA 66 GF30 e sobre PEEK, PEEK CF30 e PEEK GF30. Encontram-se aplicações destes materiais, por exemplo, na indústria aeroespacial e aeronáutica, em biomecânica e elementos de construção de máquinas. Em grande parte destas aplicações é necessário obter superfícies com elevada qualidade o que exige operações de maquinagem.

As poliamidas são materiais termoplásticos com aplicação corrente a nível industrial enquanto que as poli (éter-eter-cetonas) reforçadas são materiais compósitos avançados com enormes potencialidades no futuro. A maior parte das referências sobre a maquinagem de compósitos de matriz polimérica centram-se no estudo de materiais termoendurecíveis logo os termoplásticos constituem um domínio interessante para investigação, tendo em conta o excelente conjunto de propriedades que exibem.

O desenvolvimento experimental compreendeu os ensaios em corte ortogonal realizados com dois tipos de ferramentas, as pastilhas de carbonetos sinterizados (K10) e os insertos de diamante policristalino (PCD), e planos de ensaios específicos para verificar certos efeitos como a profundidade de corte ou o material e geometria da ferramenta. Durante o processo de torneamento registaram-se de um modo contínuo as forças de corte, o que permitiu em conjunto com a medição da espessura de apra definir o modelo físico de corte para estes materiais e estabelecer relações com o modelo teórico de Merchant. A medição da rugosidade permitiu também obter resultados para analisar a maquinabilidade destes materiais compósitos. Recorreu-se também a técnicas estatísticas nomeadamente à análise de variância, para estabelecer modelos de previsão e otimizar as condições de corte.



## Índice

**Dedicatoria**

**Tribunal-Jury**

**Agradecimientos**

**Resumen**

**Abstract**

**Resumo**

**Índice**

**Nomenclatura**

**Índice de figuras**

**Índice de tablas**

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Consideraciones generales	3
1.2. Objetivos y organización del trabajo	5
<b>2. Mecanizado de materiales compuestos de matriz polimérica</b>	<b>12</b>
2.1. Materiales compuestos	13
2.1.1. Generalidades	13
2.1.2. Constituyentes y procesos de fabricación	14
2.1.3. Propiedades y aplicaciones	20
2.2. Mecanizado	24
2.2.1. Modelos de corte	25
2.2.2. Maquinabilidad	28
2.2.2.1. Propiedades del material	30
2.2.2.2. Parámetros de corte	30

2.2.2.3. Herramientas de corte	31
2.2.2.4. Criterios de maquinabilidad	35
2.2.2.4.1. Fuerza y potencia de corte	36
2.2.2.4.2. Desgaste de la herramienta	36
2.2.2.4.3. Acabado superficial	37
2.3. Síntesis	40
<b>3. Trabajo experimental</b>	<b>44</b>
3.1. Generalidades	44
3.2. Materiales ensayados	45
3.2.1. Preparación de las probetas	48
3.3. Máquinas y herramientas	51
3.3.1. Torno CNC	51
3.3.2. Herramientas de corte	53
3.3.3. Parámetros funcionales de corte	55
3.3.3.1. Corte ortogonal	56
3.3.3.2. Efecto de la profundidad de pasada	57
3.3.3. Empleo de herramientas de diamante revestido con rompe virutas	58
3.4. Técnicas experimentales de caracterización	58
3.4.1. Fuerzas de corte	58
3.4.2. Virutas	61
3.4.3. Rugosidad superficial	63
3.4.4. Desgaste	67
3.5. Síntesis	69
<b>4. Modelo físico de corte</b>	<b>74</b>
4.1. Generalidades	74
4.2. Modelo de corte ortogonal	75
4.3. Modelo de corte para materiales compuestos de matriz termoplástica	79
4.3.1. Poliamidas	82
4.3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)	90
4.4. Discusión de resultados	100

<b>5. Modelos estadísticos para el análisis de la maquinabilidad</b>	<b>103</b>
5.1. Generalidades	103
5.2. Metodología	104
5.2.1. Análisis de los datos	107
5.3. Análisis de varianza (ANOVA)	111
5.3.1. Poliamidas	112
5.3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)	120
5.4. Modelos de predicción	129
5.4.1. Poliamidas	130
5.4.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)	132
5.5 Validación del modelo estadístico	135
5.5.1. Poliamidas	136
5.5.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)	137
5.6. Discusión de los resultados	140
<b>6. Análisis experimental de la maquinabilidad</b>	<b>144</b>
6.1. Generalidades	144
6.2. Definición de maquinabilidad	145
6.3. Fuerza y potencia de corte	148
6.3.1. Poliamidas	149
6.3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)	155
6.4. Acabado superficial	160
6.4.1. Poliamidas	160
6.4.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)	166
6.5. Efecto de la profundidad de pasada	171
6.5.1. Poliamidas	172
6.5.1.1. Fuerza y potencia de corte	172
6.5.1.2. Acabado superficial	176
6.5.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)	178
6.5.2.1. Fuerza y potencia de corte	178
6.5.2.2. Acabado superficial	182
6.6. Efecto de la herramienta	183
6.6.1. Poliamidas	186
6.6.1.1. Fuerza y potencia de corte	186

6.6.1.2. Acabado superficial	191
6.6.1.3. Tipo de viruta	196
6.6.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)	198
6.6.2.1. Fuerza y potencia de corte	198
6.6.2.2. Acabado superficial	202
6.6.2.3. Tipo de viruta	205
6.7. Productividad de la herramienta	207
6.8. Propuesta de índice de maquinabilidad	210
6.8.1. Poliamidas	211
6.8.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)	212
6.9. Discusión de resultados	214
<b>7. Síntesis, conclusiones y desarrollos futuros</b>	<b>219</b>
<i>Synthesis, conclusions and future developments</i>	
7.1. Síntesis de los trabajos desarrollados	219
<i>Synthesis of the developed works</i>	
7.2. Conclusiones generales	220
<i>General conclusions</i>	
7.3. Perspectivas para futuros trabajos de investigación	223
<i>Perspective for future investigation</i>	
<b>8. Referencias bibliográficas</b>	<b>227</b>
<b>9. Anexos</b>	<b>249</b>
A. Anexo del Capítulo 4	
B. Anexo del Capítulo 5	
C. Anexo del Capítulo 6	

## NOMENCLATURA

En la redacción de este documento se han definido, siempre que ha sido posible, los símbolos y las abreviaturas empleados. No obstante, para facilitar una consulta posterior, se presentan a continuación los símbolos y abreviaturas utilizados y su significado.

### Símbolos

D	Diámetro de la probeta (mm)
e	Espesor teórico de viruta (mm)
e'	Espesor real de viruta (mm)
E	Esbeltez mecánica
F	Razón F
F <sub>a</sub>	Fuerza de avance (N)
F <sub>c</sub>	Fuerza de corte (N)
F <sub>m</sub>	Fuerza de mecanizado (N)
F <sub>p</sub>	Fuerza de penetración (N)
K <sub>s</sub>	Fuerza específica de corte (N/mm <sup>2</sup> )
L	Longitud de la probeta (mm)
n	Velocidad de rotación del cabezal del torno (rpm)
P	Profundidad de corte (mm)
P (%)	Porcentaje de contribución
P <sub>c</sub>	Potencia de corte (W)
R	Relación de espesores de viruta o relación de corte
r <sub>p</sub>	Radio de punta de la herramienta (mm)
R <sub>a</sub>	Rugosidad media aritmética (μm)
R <sub>c</sub>	Relación inversa de espesores de viruta
R <sub>p</sub>	Altura máxima de crestas (μm)
R <sub>q</sub>	Desviación media cuadrática del perfil de rugosidad (μm)
R <sub>t</sub>	Amplitud máxima del perfil de rugosidad (μm)

$V_a$	Velocidad de avance (m/min)
$V_B$	Desgaste (mm)
$V_c$	Velocidad de corte (mm/rev)
$V_{exp}$	Valor obtenido experimentalmente
$V_m$	Valor medio obtenido aplicando el modelo de predicción

### Símbolos griegos

$\alpha$	Ángulo de la arista de corte ( $^\circ$ )
$\gamma$	Ángulo de posición ( $^\circ$ )
$\varepsilon$	Deformación (mm)
$\Phi$	Ángulo de corte
$\Phi_M$	Ángulo de corte de Merchant
$\Phi_{Mc}$	Ángulo de corte de Merchant corregido
$\lambda$	Ángulo de inclinación ( $^\circ$ )
$\mu$	Coefficiente de fricción
$\rho$	Ángulo de fricción ( $^\circ$ )
$\sigma$	Tensión normal ( $N/mm^2$ )
$\chi$	Ángulo de ataque ( $^\circ$ )
$\tau$	Tensión tangencial ( $N/mm^2$ )

## Abreviaturas

ANOVA	Análisis de varianza
CNC	Control numérico por computador
CVD	Herramienta revestida de diamante por deposición química en fase vapor
DIN	Norma alemana
DQM	Varianzas
GI	Grados de libertad
H10	Herramienta de carburo cementado dotada de rompe virutas
IM	Índice de maquinabilidad
ISO	Organización internacional de normalización
IT	Calidad superficial / tolerancia ( $\mu\text{m}$ )
K10	Herramienta de carburo cementado
MACTRIB	Grupo de mecanizado y tribología de la Universidad de Aveiro
MEF	Método de elementos finitos
MRA	Análisis de regresión múltiple
PA 6	Poliamida natural (sin refuerzo)
PA 66-GF30	Poliamida reforzada con 30% de fibras de vidrio
PCD	Herramienta de diamante policristalino
PEEK	Poli (éter-éter-cetona) natural (sin refuerzo)
PEEK CF30	Poli (éter-éter-cetona) reforzada con 30% de fibras de carbono
PEEK GF30	Poli (éter-éter-cetona) reforzada con 30% de fibras de vidrio
SQ	Suma de cuadrados
UNE	Norma española
VMR	Volumen de material removido

## Índice de Figuras

Fig. 1.1. Algunas aplicaciones de los materiales compuestos de matriz termoplástica: a) cojinetes, b) engranajes, c) otros elementos (Fuente: ERTA®, IGUS®)

Fig. 1.2. Esquema del material reforzado con fibras cortas

Fig. 1.3. Ejemplo de fibras de carbono diseminadas en la matriz de PEEK en el material PEEK CF30, obtenidas por microscopía electrónica de barrido

Fig. 2.1. Constituyentes de los materiales compuestos (Krishan et al., 1998)

Fig. 2.2. Detalle de fabricación de la fibra de vidrio (Antequera, 1991)

Fig. 2.3. Obtención de piezas huecas mediante bobinado continuo (Miravete, 2000)

Fig. 2.4. Porcentajes de aplicación de los materiales compuestos de matriz polimérica en diferentes sectores productivos

Fig. 2.5. Factores que afectan a la maquinabilidad

Fig. 3.1. Dimensiones características de las fibras de refuerzo cortas

Fig. 3.2. Probetas de trabajo: a) Dimensiones, b) Ejemplos de probetas ensayadas

Fig. 3.3. Planteamiento de ensayos sobre las probetas: a) Esquema, b) Probeta tipo

Fig. 3.4. 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

Fig. 3.5. Herramientas utilizadas en los ensayos

Fig. 3.6. Detalle de fijación del portaherramientas utilizado en los ensayos



Fig. 3.7. Interacción herramienta-pieza de trabajo:

a) Componentes de la fuerza de mecanizado, b) Reacciones sobre la herramienta

Fig. 3.8. 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"

Fig. 3.9. 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

Fig. 3.10. Diferentes formas de viruta según la Norma ISO 3685/1993

Fig. 3.11. Evaluación del espesor de la viruta mediante micrómetro digital

Fig. 3.12. Observación morfológica de las virutas con microscopio óptico

Fig. 3.13. Rugosímetro Hommeltester - T 1000 utilizado para caracterizar las superficies torneadas

Fig. 3.14. Diagrama de las 5 medidas de rugosidad realizadas en el perímetro de la superficie torneada

Fig. 3.15. Amplitud máxima del perfil de rugosidad  $R_t$  (ISO 4287/1)

Fig. 3.16. Definición de  $R_q$  y  $R_p$  (ISO 4287/1)

Fig. 3.17. Ejemplos de medida de la rugosidad: a) PA 66-GF30 mecanizada con PCD ( $V_c = 100$  m/min,  $V_a = 0.2$  mm/rev), b) PEEK GF30 mecanizado con PCD ( $V_c = 200$  m/min,  $V_a = 0.05$  mm/rev)

Fig. 3.18. Aspecto de las superficies mecanizadas

Fig. 3.19. Instrumental utilizado para la observación y medida del desgaste

Fig. 3.20. Medida del desgaste lineal en una pastilla (según Norma ISO 3685)

Fig. 4.1. Modelo de corte ortogonal: a) Interacción herramienta-pieza y formación de la viruta, b) Detalle del plano de corte

Fig. 4.2. Comparación de los modelos teóricos con resultados experimentales obtenidos en diferentes metales (Boothroy et al., 1989; Michelletti, 1977): (1) Ernst y Merchant, (2) Lee y Shaffer, (3) Estaño, (4) Acero dulce, (5) Plomo, (6) Aluminio, (7) Cobre

Fig. 4.3. Muestras de virutas: a) Herramienta PCD, b) Herramienta CVD

Fig. 4.4. Evolución del ángulo de corte ( $\Phi$ ) en función de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ): a) PCD, b) K10

Fig. 4.5. Evolución de la tensión normal (a) y de la tensión tangencial (b) en función de los parámetros de corte (herramienta PCD)

Fig. 4.6. Evolución de la tensión normal (a) y de la tensión tangencial (b) en función de los parámetros de corte (herramienta K10)

Fig. 4.7. Evolución de la deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) en función de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ): a) PCD, b) K10

Fig. 4.8. Comparativa del ángulo de corte ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_m$ ) (herramienta PCD): a) PA 6, b) PA 66 GF30

Fig. 4.9. Comparativa del ángulo de corte ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_m$ ) (herramienta K10): a) PA 6, b) PA 66 GF30

Fig. 4.10. Evolución del ángulo de corte ( $\Phi$ ) en función de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ): a) PCD, b) K10

Fig. 4.11. Evolución de la tensión normal (a) y de la tensión tangencial (b) en función de los parámetros de corte (herramienta PCD)

Fig. 4.12. Evolución de la tensión normal (a) y de la tensión tangencial (b) en función de los parámetros de corte (herramienta K10)

Fig. 4.13. Evolución de la deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) en función de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ): a) PCD, b) K10

Fig. 4.14. Comparativa del ángulo de corte ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_m$ ) (herramienta PCD): PEEK, b) CF30, c) GF30

Fig. 4.15. Comparativa del ángulo de corte ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_m$ ) (herramienta K10): a) PEEK, b) CF30, c) GF30

Fig. 5.1. Representación de los porcentajes de contribución: fuerza de mecanizado en poliamidas

Fig. 5.2. Representación de los porcentajes de contribución: potencia de corte en poliamidas

Fig. 5.3. Representación de los porcentajes de contribución: fuerza específica de corte en poliamidas

Fig. 5.4. Representación de los porcentajes de contribución: Rugosidad media ( $R_a$ ) en poliamidas

Fig. 5.5. Representación de los porcentajes de contribución: Rugosidad máxima ( $R_t$ ) en poliamidas

Fig. 5.6. Representación de los porcentajes de contribución: fuerza de mecanizado en PEEK

Fig. 5.7. Representación de los porcentajes de contribución: potencia de corte en PEEK

Fig. 5.8. Representación de los porcentajes de contribución: fuerza específica de corte en PEEK

Fig. 5.9. Representación de los porcentajes de contribución: Rugosidad media ( $R_a$ ) en PEEK

Fig. 5.10. Representación de los porcentajes de contribución: Rugosidad máxima ( $R_t$ ) en PEEK

Fig. 6.1. Representación del modelo de torneado cilíndrico

Fig. 6.2. Ejemplo de evolución de las fuerzas de corte para PA 66-GF30: a) PCD, b) K10

Fig. 6.3. Variación de la fuerza de mecanizado en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10

Fig. 6.4. Variación de la potencia de corte en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10

Fig. 6.5. Variación de la fuerza específica de corte en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10

Fig. 6.6. Ejemplo de evolución de las fuerzas de corte para PEEK CF30: a) PCD, b) K10

Fig. 6.7. Variación de la fuerza de mecanizado en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10

Fig. 6.8. Variación de la potencia de corte en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10

Fig. 6.9. Variación de la fuerza específica de corte en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10

Fig. 6.10. Evolución de  $R_a$  en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10.

Fig. 6.11. Evolución de  $R_t$  en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10.

Fig. 6.12. Representación de la precisión dimensional en las poliamidas: a) PCD, b) K10

Fig. 6.13. Evolución de Ra en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante, P= 2 mm: a) PCD, b) K10.

Fig. 6.14. Evolución de Rt en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante, P= 2 mm: a) PCD, b) K10.

Fig. 6.15. Representación de la precisión dimensional en poli (éter-éter-cetonas): a) PCD, b) K10

Fig. 6.16. Evolución de la fuerza de mecanizado en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.17. Evolución de la potencia de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.18. Evolución de la fuerza específica de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.19. Evolución de Ra en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.20. Evolución de Rt en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.21. Evolución de la fuerza de mecanizado en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.22. Evolución de la potencia de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.23. Evolución de la presión específica de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.24. Evolución de Ra en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.25. Evolución de Rt en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Fig. 6.26. Elementos fundamentales de la geometría de una herramienta de corte (Groover, 1997)

Fig. 6.27. Variación del ángulo de ataque del rompe virutas

Fig. 6.28. Evolución de la fuerza de mecanizado con la velocidad de avance: CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.29. Evolución de la potencia de corte con la velocidad de avance: a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.30. Evolución de la fuerza específica de corte con la velocidad de avance: a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.31. Representación del ratio  $F_a/F_c$  para los dos materiales y las tres herramientas ( $V_c=100$  m/min,  $V_a=0.10$  mm/rev)

Fig. 6.32. Evolución de  $R_a$  con la velocidad de avance: a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.33. Evolución de  $R_t$  con la velocidad de avance: a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.34. Ángulo de la arista de corte: a) CVD, b) PCD

Fig. 6.35. Representación del ratio  $R_a/R_t$  para los dos materiales y las tres herramientas ( $V_c=100$  m/min,  $V_a=0.1$  mm/rev)

Fig. 6.36. Virutas obtenidas al mecanizar las poliamidas: a) Herramienta plana, b) Herramienta con rompe-virutas.

Fig. 6.37. Efecto de las fibras de refuerzo en la morfología de la viruta (3x): a) PA 6, b) PA 66-GF30

Fig. 6.38. Identificación de los bordes de tracción/compresión en una viruta tipo

Fig. 6.39. Evolución de la fuerza de mecanizado con la velocidad de avance: a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.40. Evolución de la potencia de corte con la velocidad de avance: a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.41. Evolución de la fuerza específica de corte con la velocidad de avance: a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.42. Representación del ratio  $F_a/F_c$  para los dos materiales y las tres herramientas ( $V_c=100$  m/min,  $V_a=0.1$  mm/rev)

Fig. 6.43. Evolución de  $R_a$  con la velocidad de avance: a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.44. Evolución de  $R_t$  con la velocidad de avance: a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Fig. 6.45. Representación del ratio  $R_a/R_t$  para los dos materiales y las tres herramientas ( $V_c=100$  m/min,  $V_a=0.1$  mm/rev)

Fig. 6.46. Virutas obtenidas al mecanizar la poli (éter-éter-cetona) (PEEK): a) Herramienta plana, b) Herramienta con rompe-virutas.

Fig. 6.47. Efecto de las fibras de refuerzo en la morfología de la viruta (3x): a) PEEK, b) PEEK CF30

Fig. 6.48. Parámetros geométricos para el cálculo del volumen de material removido

Fig. 6.49. Observación del desgaste de las herramientas (30x): a) K10, b) H10, c) PCD, d) CVD

Fig. 6.50. Representación  $V_B$  Vs VMR para las herramientas K10 y PCD

Fig. 6.51. Índice de maquinabilidad (IM) en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte: a)PCD, b) K10

Fig. 6.52. Comparativa del IM para PCD y K10 en función de la velocidad de avance para  $V_c=200$  m/min

Fig. 6.53. Índice de maquinabilidad (IM) en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte: a)PCD, b) K10

Fig. 6.54. Comparativa del IM para PCD y K10 en función de la velocidad de avance para  $V_c=200$  m/min

## Índice de tablas

Tabla 2.1. Características del refuerzo (Krishan, 1998)

Tabla 2.2. Comparación entre los diferentes tipos de fibras de refuerzo (Miravete, 2000)

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas de las fibras más comunes utilizadas en los plásticos reforzados (\*: producto comercial de Hercules, +: producto comercial de Amoco, \$: producto comercial de Du Pont)

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas de las matrices más comunes en los plásticos reforzados con fibras

Tabla 3.1. Propiedades de los materiales ensayados (ERTA®)

Tabla 3.2. Características del torno

Tabla 3.3. Identificación y geometría de las herramientas utilizadas en los ensayos

Tabla 3.4. Parámetros de corte

Tabla 3.5. Condiciones de corte utilizadas en los ensayos de verificación del efecto de la profundidad de pasada

Tabla 3.6. Condiciones de corte utilizadas en los ensayos de verificación del efecto del rompe virutas

Tabla 3.7. Parámetros de calibración utilizados

Tabla 4.1. Tipología de virutas obtenida en función del material y de la herramienta (véase Figura 2.11)

Tabla 5.1. Matriz ortogonal L<sub>9</sub> (2<sup>4</sup>)

Tabla 5.2. Asignación de niveles a los factores

Tabla 5.3. Tabla ANOVA

Tabla 5.4. Tabla ANOVA para la fuerza de mecanizado: poliamidas

Tabla 5.5. Tabla ANOVA para la potencia de corte: poliamidas

Tabla 5.6. Tabla ANOVA para la fuerza específica de corte: poliamidas

Tabla 5.7. Tabla ANOVA para la rugosidad media: poliamidas

Tabla 5.8. Tabla ANOVA para la rugosidad máxima: poliamidas

Tabla 5.9. Tabla ANOVA para la fuerza de mecanizado: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.10. Tabla ANOVA para la potencia de corte: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.11. Tabla ANOVA para la fuerza específica de corte: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.12. Tabla ANOVA para rugosidad media: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.13. Tabla ANOVA para la rugosidad máxima: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.14. Modelos de predicción para fuerza de mecanizado: poliamidas

Tabla 5.15. Modelos de predicción para potencia de corte: poliamidas

Tabla 5.16. Modelos de predicción para fuerza específica de corte: poliamidas

Tabla 5.17. Modelos de predicción para rugosidad media: poliamidas

Tabla 5.18. Modelos de predicción para rugosidad máxima: poliamidas

Tabla 5.19. Modelos de predicción para fuerza de mecanizado: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.20. Modelos de predicción para potencia de corte: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.21. Modelos de predicción para fuerza específica de corte: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.22. Modelos de predicción para rugosidad media: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.23. Modelos de predicción para rugosidad máxima: poli (éter-éter-cetonas)

Tabla 5.24. Parámetros de corte utilizados en los ensayos de confirmación

Tabla 5.25. Validación del modelo experimental de las poliamidas: F<sub>m</sub>

Tabla 5.26. Validación del modelo experimental de las poliamidas: P<sub>c</sub>

Tabla 5.27. Validación del modelo experimental de las poliamidas: K<sub>s</sub>

Tabla 5.28. Validación del modelo experimental de las poliamidas: Ra

Tabla 5.29. Validación del modelo experimental de las poliamidas: Rt

Tabla 5.30. Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas): F<sub>m</sub>

Tabla 5.31. Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas): P<sub>c</sub>

Tabla 5.32. Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas): K<sub>s</sub>



- Tabla 5.33. Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas): Ra
- Tabla 5.34. Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas): Rt
- Tabla 6.1. Valor de la precisión dimensional (IT): Poliamidas
- Tabla 6.2. Valor de la precisión dimensional (IT): Poli (éter-éter-cetonas)
- Tabla 6.3. Volumen de material removido por cada herramienta (PCD, K10)
- Tabla A.1. Valores de fuerzas de corte y espesores de viruta en función de los parámetros de corte: PCD en Poliamidas
- Tabla A.2. Valores de fuerzas de corte y espesores de viruta en función de los parámetros de corte: K10 en Poliamidas
- Tabla A.3. Valores de fuerzas de corte y espesores de viruta en función de los parámetros de corte: PCD en Poli (éter-éter-cetonas)
- Tabla A.4. Valores de fuerzas de corte y espesores de viruta en función de los parámetros de corte: K10 en Poli (éter-éter-cetonas)
- Tabla A.5. Valores de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ) (Ecs 4.1, 4.2, 4.3) y del ángulo de corte ( $\Phi$ ) (Ec. 4.4)
- Tabla A.6. Valores de la tensión normal ( $\sigma$ ) (Ec. 4.4), tensión tangencial ( $\tau$ ) (Ec. 4.5) y deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) (Ec. 4.6)
- Tabla A.7. Valores del ángulo de fricción ( $\rho$ ) y del coeficiente de fricción ( $\mu$ )(Ec.4.8)
- Tabla A.8. Valores del ángulo de Merchant ( $\Phi_M$ ) (Ec. 4.8), constante de Merchant ( $\delta$ ) y ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ) (Ec. 4.10)
- Tabla A.9. Valores de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ) (Ecs 4.1, 4.2, 4.3) y del ángulo de corte ( $\Phi$ ) (Ec. 4.4)
- Tabla A.10. Valores de la tensión normal ( $\sigma$ ) (Ec. 4.4), tensión tangencial ( $\tau$ ) (Ec. 4.5) y deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) (Ec. 4.6)
- Tabla A.11. Valores del ángulo de fricción ( $\rho$ ) y del coeficiente de fricción ( $\mu$ )(Ec.4.8)
- Tabla A.12. Valores del ángulo de Merchant ( $\Phi_M$ ) (Ec. 4.8), constante de Merchant ( $\delta$ ) y ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ) (Ec. 4.10)
- Tabla B.1. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte: PCD en poliamidas
- Tabla B.2. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte: K10 en poliamidas
- Tabla B.3. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte: PCD en poli (éter-éter-cetonas)
- Tabla B.4. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte: K10 en poli

(éter-éter-cetonas)

Tabla B.5. Valores de  $R_a$  y  $R_t$  en función de los parámetros de corte: PCD en poliamidas

Tabla B.6. Valores de  $R_a$  y  $R_t$  en función de los parámetros de corte: K10 en poliamidas

Tabla B.7. Valores de  $R_a$  y  $R_t$  en función de los parámetros de corte: PCD en poli (éter-éter-cetonas)

Tabla B.8. Valores de  $R_a$  y  $R_t$  en función de los parámetros de corte: K10 en poli (éter-éter-cetonas)

Tabla C.1. Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de los parámetros de corte: PCD en Poliamidas

Tabla C.2. Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de los parámetros de corte: K10 en Poliamidas

Tabla C.3. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte: PCD en Poliamidas

Tabla C.4. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte: K10 en Poliamidas

Tabla C.5. Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de los parámetros de corte: PCD en Poli (éter-éter-cetonas)

Tabla C.6. Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de los parámetros de corte: K10 en Poli (éter-éter-cetonas)

Tabla C.7. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte: PCD en Poli (éter-éter-cetonas)

Tabla C.8. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte: K10 en Poli (éter-éter-cetonas)

Tabla C.9. Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos: PCD en poliamidas

Tabla C.10. Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos: K10 en poliamidas

Tabla C.11. Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos: PCD en poli (éter-éter-cetonas)

Tabla C.12. Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos: K10 en poli (éter-éter-cetonas)

Tabla C.13. Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de la profundidad de pasada: Poliamidas

- Tabla C.14. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de la profundidad de pasada: Poliamidas
- Tabla C.15. Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos en función de la profundidad de pasada: Poliamidas
- Tabla C.16. Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de la profundidad de pasada: Poli (éter-éter-cetonas)
- Tabla C.17. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de la profundidad de pasada: Poli (éter-éter-cetonas)
- Tabla C.18. Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos en función de la profundidad de pasada: Poli (éter-éter-cetonas)
- Tabla C.19. Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función del tipo de herramienta: Poliamidas
- Tabla C.20. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función del tipo de herramienta: Poliamidas
- Tabla C.21. Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos en función del tipo de herramienta: Poliamidas
- Tabla C.22. Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función del tipo de herramienta: Poli (éter-éter-cetonas)
- Tabla C. 23. Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función del tipo de herramienta: Poli (éter-éter-cetonas)
- Tabla C.24. Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos en función del tipo de herramienta: Poli (éter-éter-cetonas)

# **Capítulo 1**

## **1. Introducción.**

### **1.1. Consideraciones generales**

### **1.2. Objetivos y organización del trabajo**

# Capítulo 1

## **1. Introducción.**

En este capítulo se definen los objetivos y se justifica el enfoque de esta Tesis Doctoral.

### **1.1. Consideraciones generales**

Los materiales compuestos de matriz polimérica tienen gran interés en diferentes aplicaciones industriales, debido a sus buenas propiedades y a su bajo peso. Sus aplicaciones se han centrado hasta la fecha en los sectores aeronáutico y aeroespacial, aunque también han irrumpido en robótica, biomecánica y automoción. Se trata de materiales con gran proyección de cara al futuro, especialmente los de naturaleza termoplástica. La Figura 1.1 muestra algunos elementos de máquinas fabricados con materiales compuestos de matriz termoplástica.

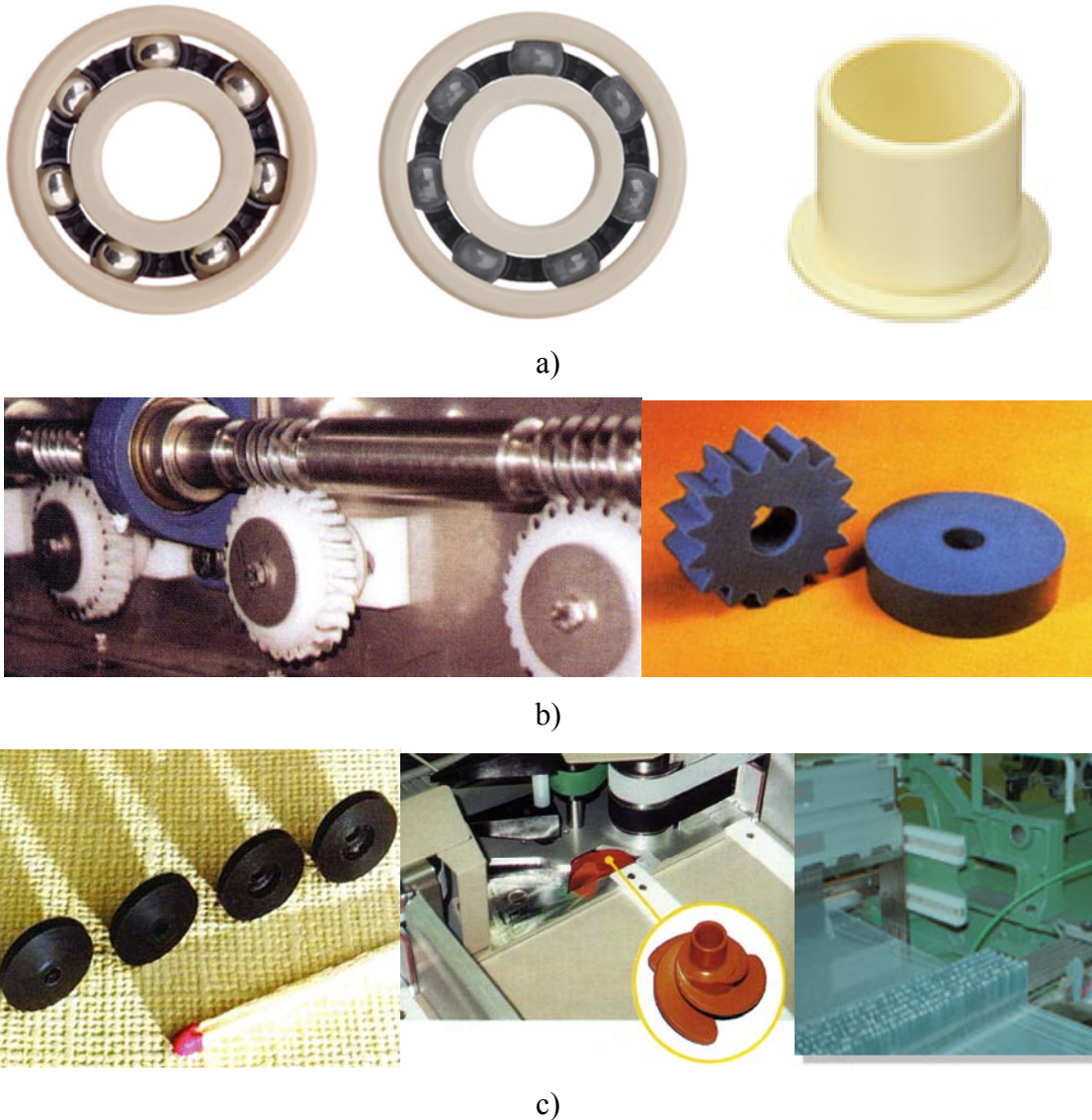


Figura 1.1 – Algunas aplicaciones de los materiales compuestos de matriz termoplástica:  
a) cojinetes, b) engranajes, c) otros elementos (Fuente: ERTA®, IGUS®)

En buena parte de las aplicaciones mencionadas, es necesario recurrir a procesos de mecanizado sobre elementos moldeados, con el fin de conferir las características dimensionales y de acabado requeridas. En particular, en aquellas aplicaciones en las que se deben materializar conjuntos mecánicos con ajustes y contactos entre diferentes piezas, es preciso garantizar alta calidad en el acabado, de modo que se hace necesario optimizar los procesos de mecanizado, en especial el proceso de torneado, por su versatilidad a la hora de realizar diferentes operaciones por arranque de viruta. Esta optimización debe comenzar sin duda alguna por una adecuada caracterización de los procesos de mecanizado

de estos materiales, analizando el comportamiento del material al interactuar con la herramienta de corte y el resultado de la operación. De manera singular, es fundamental conocer los parámetros funcionales de corte más apropiados (velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad de pasada) y el tipo de herramienta (convencional, especial), con el fin de optimizar la relación entre la calidad y el coste de la operación.

La presencia de fibras de refuerzo (vidrio o carbono) en algunos de estos materiales trae consigo el aumento del desgaste de la herramienta e influye también en la textura de las superficies mecanizadas. En este sentido, hay que seleccionar herramientas de material y geometría adecuados, al tiempo que conocer la respuesta o aptitud del material a ser mecanizado (maquinabilidad).

## **1.2. Objetivos y organización del trabajo**

En esta Tesis Doctoral se estudia el mecanizado de los materiales compuestos de matriz termoplástica; en concreto, las poliamidas, materiales conocidos desde hace ya cierto tiempo, y las poli (éter-éter-cetonas), materiales avanzados de más reciente introducción, con enormes potencialidades. Los dos grupos de materiales se estudian tanto sin refuerzo como reforzados con fibras de vidrio o fibras de carbono.

Los objetivos de este trabajo de investigación se centran en estudiar la maquinabilidad de los materiales compuestos de matriz polimérica termoplástica y definir los modelos físicos y estadísticos que permitan caracterizar los procesos de mecanizado. Los modelos de corte desarrollados hasta la fecha se han aplicado especialmente a los materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras largas. Se pretende desarrollar modelos específicos para materiales de matriz termoplástica, reforzados con fibras cortas (Figuras 1.2 y 1.3), circunstancia que les confiere un cierto carácter “homogéneo”, lo que se traduce en un comportamiento diferente ante la acción de la herramienta de corte. Las referencias encontradas en la bibliografía sobre el mecanizado de los materiales termoplásticos reforzados con fibras son muy escasas, lo que nos permite abrir una nueva línea de trabajo, dado el potencial y el creciente uso de estos materiales.

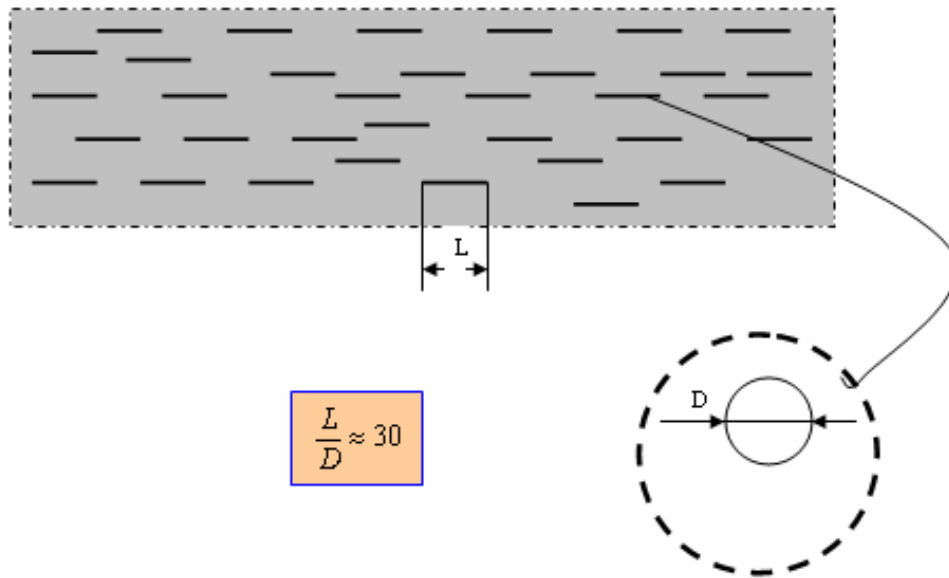


Figura 1.2 – Esquema del material reforzado con fibras cortas

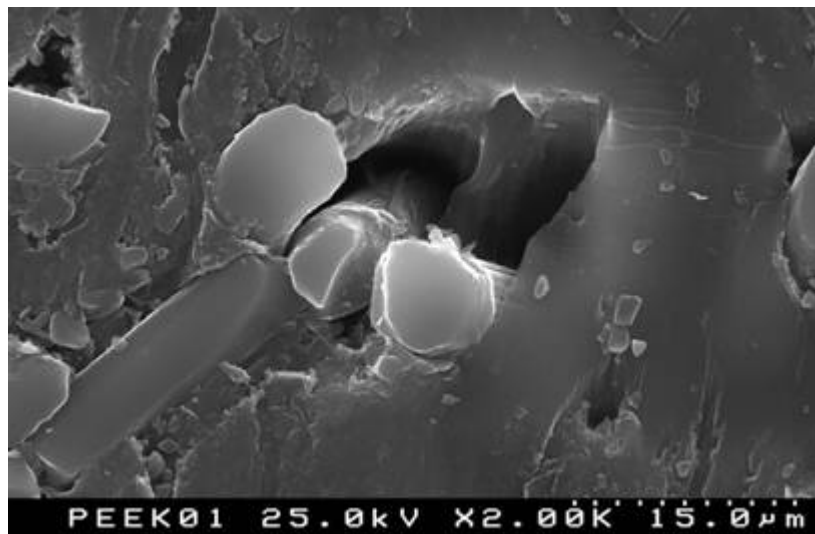


Figura 1.3 – Ejemplo de fibras de carbono diseminadas en la matriz de PEEK en el material PEEK CF30, obtenidas por microscopía electrónica de barrido

Como aportación original, este trabajo de investigación analiza diferentes aspectos de la maquinabilidad y propone modelos de corte tendentes a optimizar los procesos de mecanizado. Las conclusiones a las que se llega tienen interés no sólo para futuras investigaciones que profundicen en ciertos aspectos o versen sobre cuestiones con otros enfoques complementarios, sino también para la industria, en la medida en que los resultados obtenidos plantean ciertas pautas a seguir desde el punto de vista práctico.



Los resultados de este trabajo de investigación se espera sean de utilidad en diferentes sectores, a saber:

- Biomecánico: desarrollo de prótesis óseas, material deportivo, etc.
- Aeroespacial: construcción de fuselajes y componentes para aeronaves, sondas espaciales, etc.
- Construcción de máquinas y equipos industriales: ejes, cojinetes, levas, etc.
- Automoción: componentes mecánicos, paneles de carrocería, etc.
- Robótica: estructura y mecanismos.
- “Micromecánico”: prototipado, micromecanismos.
- Construcción civil y otros

En todos estos sectores se utilizarán, muy probablemente, cada vez más los materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibras debido a su bajo peso, elevada rigidez y resistencia y propiedades direccionales. Se trata de materiales avanzados de altas prestaciones, cuya utilización se ha incrementado de forma significativa en los últimos años. La integración de componentes elaborados con estos materiales en sistemas tribológicos (mecanismos, conjuntos mecánicos) exige la adaptación de los procesos de mecanizado (máquinas, parámetros funcionales de corte y herramientas, fundamentalmente) para conseguir calidades superficiales elevadas a costes competitivos.

Comentamos brevemente, a continuación, lo tratado en los diferentes capítulos de esta disertación.

En el **Capítulo 2** se realiza una amplia revisión bibliográfica, que indaga en el estado del arte sobre el mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica y se nutre fundamentalmente de artículos científicos publicados en revistas internacionales. Desde el conocimiento de sus propiedades y aplicaciones, se estudia ampliamente su maquinabilidad y se documentan los modelos de corte que han sido definidos por diferentes investigadores. Estos modelos de corte se refieren en especial a los materiales de matriz termoestable, dado que la caracterización del mecanizado de los materiales compuestos termoplásticos es incipiente, lo que justifica el eje rector de este trabajo de investigación.

En el **Capítulo 3** se detalla la experimentación llevada a cabo. Se describen los materiales seleccionados, sus propiedades y características fundamentales, así como la preparación de las probetas de ensayo. Igualmente, se identifican los equipos utilizados en los ensayos de mecanizado (máquinas y herramientas) y en la instrumentación y mediciones efectuadas (fuerzas de corte, rugosidad, etc.). Se concretan los parámetros funcionales del proceso de corte seleccionados para caracterizar la maquinabilidad de estos materiales y definir sus modelos (físicos y estadísticos) de corte.

Con el conjunto de materiales, herramientas y parámetros funcionales de corte se diseña el plan experimental (serie principal de ensayos, series específicas para verificar ciertos efectos de interés), de acuerdo con criterios de solvencia reconocida. Todos los ensayos de corte son repetidos en las mismas condiciones, utilizando el valor medio de los parámetros medidos en los análisis ulteriores.

En el **Capítulo 4** se presentan los modelos físicos de corte para los dos grupos de materiales (poliamidas y poli (éter-éter-cetonas) y herramientas utilizadas (carburo cementado, diamante policristalino). A partir de los registros de fuerzas de corte y espesores de viruta se determinan algunos parámetros fundamentales que van a permitir caracterizar el mecanizado de estos materiales (ángulos de corte, tensiones, deformaciones, etc.) y definir ecuaciones que expliciten su comportamiento. En este sentido, los resultados obtenidos se comparan con el modelo teórico de Merchant, definido para los metales, y se pone de manifiesto cómo el efecto de las fibras de refuerzo genera modelos con desviaciones importantes respecto de este patrón.

En el **Capítulo 5** se lleva a cabo el tratamiento estadístico de los resultados experimentales, recurriendo a análisis de varianza, sobre la base de aplicación de las técnicas de Taguchi, y a la obtención de diversas correlaciones o leyes interesantes mediante regresión múltiple (modelos de predicción), que permitan describir los procesos estudiados.

En el **Capítulo 6** se presenta un estudio experimental de la maquinabilidad de estos materiales, atendiendo fundamentalmente a las fuerzas de corte (proceso) y a la rugosidad superficial (pieza). Se estudian también algunos efectos interesantes, como el de la geometría de la herramienta o la profundidad de corte. Respecto de la influencia del tipo de

herramienta cabe destacar el empleo de revestimientos de diamante por deposición química en fase vapor (CVD), que permiten obtener resultados semejantes, en términos generales, a las herramientas de diamante policristalino (PCD).

Por último, se recogen en el **Capítulo 7** las conclusiones generales del trabajo de investigación, dejando abiertas posibles vías que dieran continuidad y permitieran completar determinados aspectos, y se listan finalmente las **Referencias bibliográficas** consultadas. Las últimas páginas de este documento se reservan para incorporar las tablas con los resultados de las medidas y cálculos realizados en los **Anexos**.

# Capítulo 2

## **2. Mecanizado de materiales compuestos de matriz polimérica.**

### **2.1. Materiales compuestos**

#### **2.1.1. Generalidades**

#### **2.1.2. Constituyentes y procesos de fabricación**

#### **2.1.3. Propiedades y aplicaciones**

### **2.2. Mecanizado**

#### **2.2.1. Modelos de corte**

#### **2.2.2. Maquinabilidad**

##### **2.2.2.1. Propiedades del material**

##### **2.2.2.2. Parámetros de corte**

##### **2.2.2.3. Herramientas de corte**

##### **2.2.2.4. Criterios de maquinabilidad**

###### **2.2.2.4.1. Fuerza y potencia de corte**

###### **2.2.2.4.2. Desgaste de la herramienta**

###### **2.2.2.4.3. Acabado superficial**

### **2.3. Síntesis**

# Capítulo 2

## **2. Mecanizado de materiales compuestos de matriz polimérica.**

Previo a cualquier planteamiento metodológico o práctico, es preceptivo indagar para conocer, por un lado, el estado de la técnica y, por otro, recopilar un número significativo de referencias sobre las que asentar el trabajo de investigación.

En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica sobre los materiales compuestos de matriz polimérica, centrandó la atención en los materiales de matriz termoplástica reforzados con fibras cortas, que serán objeto de estudio en esta investigación. Se profundiza en el estudio de los modelos de corte y en el análisis de la maquinabilidad, destacando las fuerzas de corte y el acabado superficial como criterios más significativos para evaluar la aptitud de los materiales a ser conformados por arranque de viruta.

## 2.1. Materiales compuestos

### 2.1.1. Generalidades

Los materiales compuestos están formados por dos o más materiales de diferente naturaleza (conocidos como componentes, constituyentes o fases) que al combinarse dan como resultado la mejora de las propiedades que tienen por separado (efecto sinérgico). En general, se habla de dos constituyentes básicos, la matriz y el refuerzo, a los que se le pueden sumar aditivos como componentes minoritarios para mejorar alguna de las propiedades específicas.

La forma más general de clasificar los materiales compuestos es en base a la naturaleza de la matriz. Así, se distinguen entre materiales compuestos de matriz metálica, cerámica y polimérica (Krishan, 1998; Kalpakjian y Schmid, 2002). Los materiales compuestos de matriz polimérica son un grupo importante de materiales compuestos, y un número significativo de las investigaciones reflejadas en la literatura científica se refieren a ellos. Será a estos materiales a los que hagamos referencia específicamente en este trabajo de investigación.

La Figura 2.1 muestra los constituyentes básicos de los materiales compuestos.

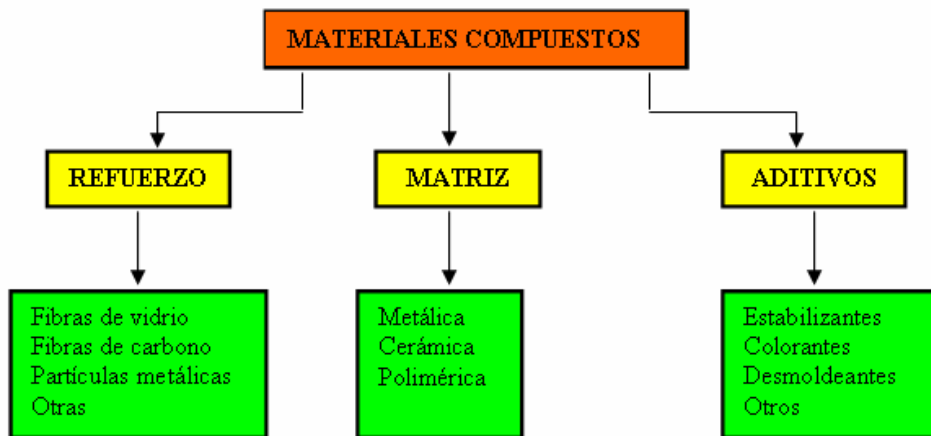


Figura 2.1. Constituyentes de los materiales compuestos (Krishan, 1998)

Los primeros materiales compuestos comenzaron a utilizarse durante la segunda guerra mundial, en la construcción de aeronaves. En pocos años fue incrementándose exponencialmente el conocimiento de estos materiales, consiguiendo reducir los costes de producción, lo que permitió abarcar nuevas aplicaciones, gracias a sus excelentes cualidades.

En la actualidad, es notable el aumento del uso de materiales compuestos en la fabricación de elementos estructurales. De este modo, los materiales tradicionales como el acero, la madera o el aluminio están cediendo ciertas aplicaciones a los materiales compuestos avanzados, denominados comúnmente “composites”, con los que se consiguen mejores propiedades específicas. De forma particular, los materiales compuestos de matriz polimérica, como los polímeros (poliéster, epoxi, etc.) reforzados con fibras de vidrio o con fibras de carbono, presentan unas excelentes relaciones rigidez/peso y resistencia/peso que los hace idóneos para determinados sectores productivos. Estos materiales se han venido utilizando desde hace tiempo en la industria aeroespacial y, más recientemente, han irrumpido con fuerza en el sector naval, en la industria del automóvil o en robótica, como ejemplos significativos, dado que ofrecen un mejor comportamiento que los materiales tradicionales.

Se distinguen dos tipos de materiales compuestos de matriz polimérica en atención a las características de la matriz y a sus propiedades: materiales termoestables y materiales termoplásticos.

La matriz termoestable endurece mediante la adición de agentes químicos apropiados o mediante la aplicación de calor y presión (*Krishan, 1998*). Dentro de este grupo de materiales compuestos de matriz polimérica, denominados genéricamente plásticos reforzados con fibras (“FRP’s”), se encuentran los plásticos reforzados con fibras de vidrio (“GFRP’s”) y los reforzados con fibras de carbono (“CFRP’s”), como exponentes para aplicaciones de ingeniería.

Las matrices termoplásticas son más duras y presentan mayores resistencias que las termoestables. Entre ellas, se pueden destacar las poliamidas (PA), las poli (éter-éter-cetonas) (PEEK) y las polieterimididas (PEI). Se utilizan normalmente en combinación con fibras de refuerzo cortas y a temperaturas no superiores a los 225 °C.

### **2.1.2. Constituyentes y procesos de fabricación**

Un composite es un material estructural que combina dos o más constituyentes para unir las características favorables de cada uno (*Kaw, 1997*). Los constituyentes se combinan a un nivel macro, de manera que no son solubles uno en el otro. Normalmente, se trata de una fase de refuerzo en forma de fibras o partículas embebidas en una matriz.

Los plásticos reforzados están constituidos 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, para absorber y soportar los diferentes tipos de fuerzas. Las fibras de refuerzo más utilizadas en aplicaciones para ingeniería son las de vidrio y las de carbono, aunque también se pueden utilizar fibras de boro y aramida.

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) (Krishan, 1998; Kalpakjian y Schmid, 2002). La Tabla 2.1 muestra una clasificación en base a las características de las fibras de refuerzo.

Tabla 2.1. Características del refuerzo (Krishan, 1998)

Tipo de fibra	Orientación
Larga y continua	Unidireccional
	Bidimensional (tejido, <i>mat</i> cosido)
	Tridimensional (tejido 3-D, cosido 3-D)
	Aleatoria ( <i>mat</i> de hilo cosido)
Discontinua	Aleatoria ( <i>mat</i> de hilo troceado)
	Predominante
Partículas y whiskers	Aleatoria
	Predominante

Normalmente, este tipo de materiales compuestos se presentan en forma de laminados unidireccionales (todo el refuerzo en una misma dirección) o en laminados bidimensionales (láminas apiladas con el refuerzo en distintas direcciones).

Cuando se utilizan fibras discontinuas, se pueden mezclar con el material de la matriz para producir una distribución aleatoria o una orientación prefijada.

Las fibras continuas se alinean normalmente de forma unidireccional, tejidas ortogonalmente o arrolladas sobre un mandril con cualquier otra disposición.

El comportamiento mecánico del material compuesto reforzado con fibras está influenciado por las propiedades de la matriz y de las fibras (Kaw, 1997). En general, las fibras aportan elevado módulo elástico, elevadas resistencia y dureza, mientras que las



resinas aportan ductilidad, baja densidad, baja resistencia y rigidez, elevada expansión térmica y baja estabilidad térmica.

La Tabla 2.2 muestra una comparación entre los diferentes tipos de materiales para la obtención de las fibras de refuerzo más utilizadas habitualmente.

Tabla 2.2. Comparación entre los diferentes tipos de fibras de refuerzo  
(Miravete et al., 2000)

	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones
<i>VIDRIO</i>	Buena relación peso/prestaciones mecánicas Facilidad de aplicación	Elevadas prestaciones mecánicas específicas	Automoción Construcción Aeronáutica
<i>CARBONO</i>	Excelente resistencia a la rotura en tracción y compresión Buena resistencia a la humedad	Precio elevado Escasa resistencia al choque	Aeronáutica Automoción Biomecánica Deporte
<i>ARAMIDA</i>	Buen comportamiento al choque Buena resistencia química	Baja resistencia a la compresión	Automoción Construcción
<i>BORO</i>	Elasticidad elevada Buen comportamiento al choque	Dificultad de utilización	Aeronáutica militar

Sin duda alguna, son las fibras de vidrio y de carbono los refuerzos más utilizados en la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica. Esto es así gracias a sus buenas características, entre las que citamos (Krishan, 1998; Miravete et al., 2000):

- excelente adherencia fibra-matriz
- resistencia mecánica específica (resistencia a tracción / densidad) superior a la del acero en la dirección de la fibra
- buenas propiedades dieléctricas
- incombustibilidad
- estabilidad dimensional
- débil conductividad térmica
- buena resistencia a los agentes químicos
- fácil procesamiento

- propiedades isotrópicas

La fibra de vidrio es el refuerzo más utilizado en la actualidad en la fabricación de materiales compuestos, sobre todo en aplicaciones industriales. Ello se debe a su gran disponibilidad, buenas características mecánicas y bajo coste.

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y se obtiene por fusión de la mezcla de estas materias, pasando por la hilera y sometiéndose a una operación de estirado. Se presenta normalmente en forma de Mat, Rovin o tejidos.

La Figura 2.2 muestra, a título meramente informativo, el proceso convencional de fabricación de la fibra de vidrio.

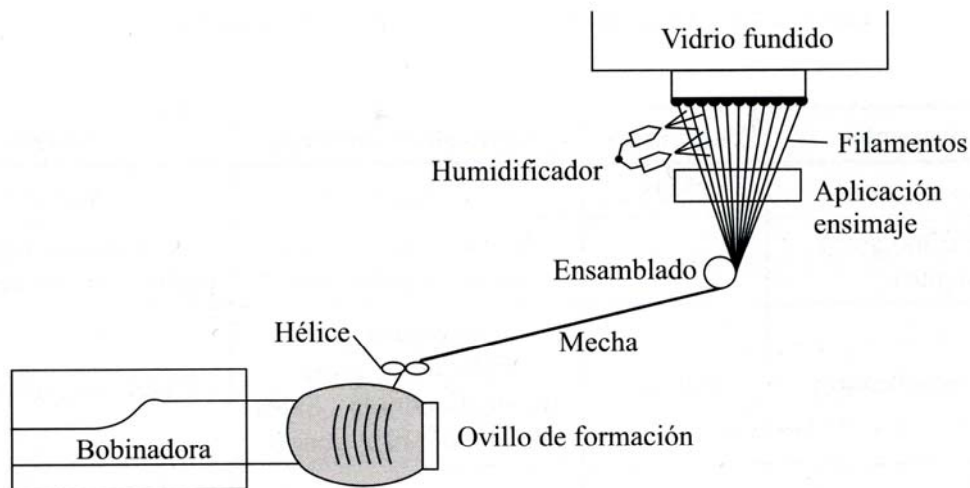


Figura 2.2. Detalle de fabricación de la fibra de vidrio (Antequera et al., 1991)

La fibra de carbono es un material excepcional para aplicaciones estructurales sometidas a cargas repetitivas o fatiga, ya que es el único material conocido cuyas propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de una carga cíclica (Miravete et al., 2000). Las fibras de carbono se fabrican mediante pirólisis controlada y ciclización de precursores de poliacrilonitrilo y alquitrán.

Los filamentos de fibra de carbono tienen un diámetro típico que oscila entre 5 y 8  $\mu\text{m}$ , y pueden presentarse en forma de mechas o tejidos.

La Tabla 2.3 muestra las propiedades elásticas y de resistencia estática de las fibras utilizadas en la conformación de materiales compuestos de matriz polimérica.

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas de las fibras más comunes utilizadas en los plásticos reforzados (\*: producto comercial de Hercules, +: producto comercial de Amoco, \$: producto comercial de Du Pont)

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo elástico (GPa)	Resistencia tracción (MPa)	Alargamiento (%)	Coef. Poisson
<i>Fibra de vidrio</i>					
<i>E-Glass</i>	2.54	72.4	3450	4.8	0.20
<i>S-Glass</i>	2.49	89.6	4300	5	0.22
<i>Fibra de carbono</i>					
<i>AS-1 (*)</i>	1.80	228	3100	1.32	-
<i>AS-4 (*)</i>	1.80	248	4070	1.65	0.20
<i>IM-7 (*)</i>	1.78	301	5310	1.81	0.20
<i>P-100 (+)</i>	2.15	758	2410	0.32	0.20
<i>T-40 (+)</i>	1.81	290	5650	1.80	-
<i>T-300 (+)</i>	1.76	231	3650	1.40	0.20
<i>Fibra de boro</i>	2.70	393	3100	0.8	0.20
<i>Fibra de aramida</i>					
<i>Kevlar 49 (\$)</i>	1.45	131	3620	2.8	0.35
<i>Kevlar 149 (\$)</i>	1.47	179	3450	1.9	-

En cuanto a las matrices, se trata de resinas orgánicas de poliéster, viniléster, fenólicas, epoxi, poliuretano, poli (éter-éter-cetona), poliamida, etc. Las resinas de poliéster representan entorno al 75% del total. Dentro de ellas, las más utilizadas son las ortoftálicas, las isoftálicas y las bisfenólicas.

Las funciones de la matriz se centran en (*Krishan, 1998; Miravete et al., 2000; Kalpakjian y Schmid, 2002*):

- aglutinar y fijar las fibras, de acuerdo con la geometría deseada
- transmitir los esfuerzos a las fibras
- proteger a las fibras de los esfuerzos de compresión
- proteger a las fibras de los agentes externos

Las principales limitaciones de las matrices poliméricas son la pérdida de propiedades a alta temperatura, la susceptibilidad medioambiental (humedad, radiaciones, etc.) y la baja resistencia a sollicitación cortante.

La Tabla 2.4 presenta las propiedades características de los diferentes tipos de matrices.

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas de las matrices más comunes en los plásticos reforzados con fibras

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo elástico (GPa)	Resistencia tracción (MPa)	Alargamiento (%)	Coef. Poisson
PEEK	1.30-1.32	3.24	100	50	0.4
PPS	1.36	3.30	82.7	4	-
Poliamida	1.46	3.50	103	-	0.35
Poliéster	1.10-1.40	2.10-3.40	34.5-103.5	1-5	-
Epoxi	1.38	4.60	58.6	-	0.36

Los procesos de conformación utilizados son numerosos (inyección, extrusión...) 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.) (Akay et al., 1995; Apichartpattanasiri et al., 2001; Tjong et al., 2002; Heckeley y Schomburg, 2004; Khondker et al., 2006; Converse et al., 2007). En el caso de fabricación de tubos de plástico reforzado con fibras de vidrio el procedimiento más común es el representado en la Figura 2.3, conocido como bobinado o enrollamiento filamentario (“*filament winding*”).

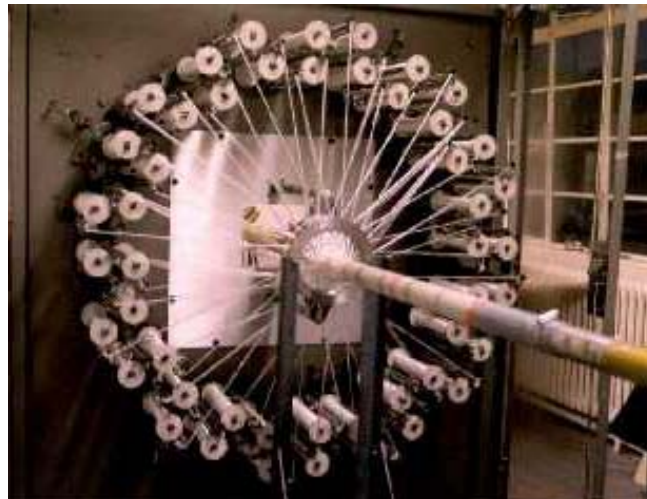


Figura 2.3. Obtención de piezas huecas mediante bobinado continuo (Miravete et al., 2000)

Estos materiales se pueden moldear con facilidad, siguiendo las especificaciones de diseño, eliminando así operaciones requeridas en el procesado de productos metálicos (Heckeley y

Schomburg, 2004). Normalmente, a estos materiales, una vez moldeados, se les somete a un proceso de mecanizado, para lograr un determinado acabado superficial.

Los materiales termoplásticos se reblandecen con la aplicación de calor y pueden ser moldeados en unas condiciones de temperatura y presión adecuadas.

### 2.1.3. Propiedades y aplicaciones

La utilización de los materiales compuestos se ha incrementado a un ritmo considerable (entorno al 6% anual) en diversos campos de la ciencia y de la tecnología debido a sus elevadas 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 (Wang y Zhang, 1995-a y 1995-b; Krishan, 1998; Miravete et al., 2000; Kalpakjian y Schmid, 2002; Davim et al., 2004; El-Sonbaty et al., 2004), 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, donde están compitiendo de manera muy satisfactoria o incluso han llegado a utilizarse en exclusiva.

A pesar de todo, en comparación con los metales y los materiales compuestos de matriz metálica, la cuota de mercado, en términos globales, es todavía pequeña, del orden de 30:1 en Europa.

La Figura 2.4 muestra en esquema el grado de utilización de los materiales compuestos de matriz polimérica en distintas aplicaciones prácticas.

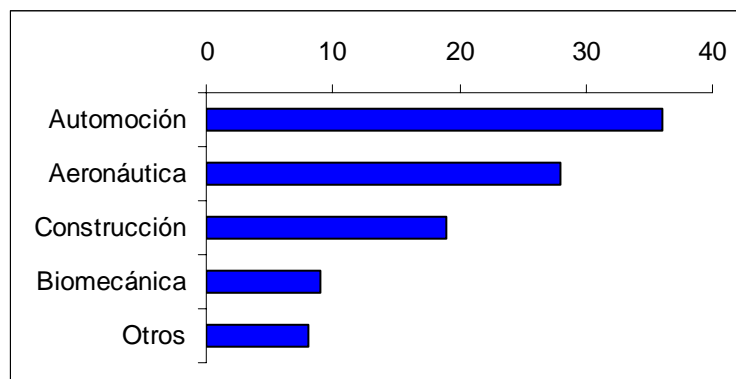


Figura 2.4. Porcentajes de aplicación de los materiales compuestos de matriz polimérica en diferentes sectores productivos

La mayor funcionalidad y la menor necesidad de mantenimiento son también dos razones adicionales para el desarrollo de estos materiales. Las propiedades direccionales permiten

dar respuesta a diferentes requerimientos de diseño. En el caso de materiales compuestos laminados, cada lámina presenta mayor rigidez y resistencia en la dirección de orientación de las fibras, de modo que disponiendo cada capa de fibras según ángulos diferentes, se pueden conseguir materiales adecuados para trabajar ante estados de carga multiaxiales.

La adición de fibras cortas a la matriz polimérica modifica de manera significativa sus propiedades mecánicas, aumentando la rigidez, la resistencia y la dureza, proporcionando adicionalmente un considerable incremento en la máxima temperatura de operación. Por otra parte, la presencia de microfibras de refuerzo permite asemejar el comportamiento de estos materiales al de los de una sola fase u homogéneos.

Las fibras de vidrio son las fibras de refuerzo utilizadas de forma mayoritaria en los termoplásticos 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, automóviles, robots y máquinas. También se utilizan cada vez más como material base de conducciones y contenedores de fluidos, en objetos deportivos, etc. En todas estas aplicaciones se requieren una alta calidad superficial, incluyendo la exactitud y la integridad superficial (*Wang y Zhang, 2003*), para lo que es preciso utilizar las herramientas y los parámetros de corte apropiados.

En comparación con los materiales monolíticos, los materiales compuestos de matriz polimérica tienen una elevada resistencia específica y rigidez, combinada con un peso muy reducido. La naturaleza anisótropa de estos materiales puede ser una desventaja para ciertas aplicaciones (*Kaw, 1997*); ahora bien, se trata de conformar los materiales orientando las fibras de refuerzo en el plano en el que son más efectivas.

Las poliamidas se caracterizan por una elevada resistencia mecánica, tenacidad, elasticidad, resistencia a la abrasión, a la fatiga y al ataque químico (*Govindan et al., 2000; Palabiyik y Bahadur, 2002; Pedroso et al., 2002; Chen et al., 2003; Chavaría y Paul, 2004; Jordan et al., 2005*). Junto a estas características exhiben también muy buena capacidad de amortiguamiento mecánico y buen comportamiento como aislante eléctrico (*Botelho et al., 2003*). Conservan sus propiedades mecánicas hasta los 150°C. Se utilizan en la fabricación de componentes de maquinaria, robótica y automoción,

fundamentalmente (*Miravete et al., 2000*). Entre estos componentes citamos: cojinetes, rodillos, ruedas, zapatas de desgaste, engranajes, inyectoros, etc. La incorporación de fibras de refuerzo mejora las características mecánicas y la estabilidad dimensional de las poliamidas (*Franke et al., 2007; Bernasconi et al., 2007*), permitiendo trabajar a temperaturas mayores.

La poli (éter-éter-cetona) (PEEK) pertenece a un grupo de materiales termoplásticos de altas prestaciones que aglutina un conjunto de propiedades excelente: elevadas propiedades mecánicas, resistencia al desgaste y a la abrasión, resistencia a los agentes químicos y puede trabajar a temperaturas elevadas. Debido a estas propiedades, este material polimérico se aplica con excepcionales prestaciones en la ingeniería. En la bibliografía se encuentran amplias referencias sobre este material (*Voss y Friedrich, 1987; Ozden et al., 1999; Davim y Marques, 2001; Abu Bakar et al., 2003; Zhang et al., 2004; Rae et al., 2007; Goyal et al., 2007*), al que se le ha prestado mucha atención en los últimos años, en especial a su síntesis y al estudio de sus propiedades.

La estructura de este termoplástico posee gran solubilidad, alto peso molecular y se caracteriza por sus excelentes propiedades. El PEEK tiene un punto de fusión de 335 °C, una temperatura de transición vítrea de 143 °C y se puede utilizar de forma continua por encima de los 250 °C sin merma permanente de sus propiedades mecánicas.

La adición de fibras cortas a este termoplástico permite conseguir grandes mejoras en propiedades como la resistencia, la rigidez o la dureza, a la vez que posibilita trabajar en buenas condiciones a temperaturas más elevadas, en relación con el material no reforzado. Las fibras de carbono y las de vidrio son los refuerzos más comunes debido a su bajo ratio de expansión y su alto módulo elástico.

El PEEK reforzado con fibras de vidrio (PEEK GF30) y el PEEK reforzado con fibras de carbono (PEEK CF30) son los mejores materiales para aplicaciones que requieren alta resistencia y rigidez, especialmente a temperaturas por encima de los 150 °C (*Harsha y Tewari, 2003; Sinmazcelik y Yilmaz, 2007; Burris y Sawyer, 2007*). Se aplican en diferentes campos, como el aeronáutico y la biomecánica, pero también en la industria aeroespacial sustituyendo al aluminio, gracias a su mejor comportamiento a altas temperaturas.

Enumeramos finalmente algunas de las aplicaciones más destacadas de los materiales compuestos de matriz polimérica en diferentes sectores descritas en la bibliografía

(Cogswell, 1992; Kukureka et al., 1999; Miravete et al., 2000; Mallick, 2001; Kalpakjian y Schmid, 2002; Kurokawa et al., 2003; Park et al., 2006; Lee et al., 2006; Kim et al., 2006; Verrey et al., 2006):

- Aeronáutica civil y militar (Fuselajes, estructuras, carenados, hélices, etc.)
- Industria del espacio (lanzaderas, transbordadores, naves, satélites)
- Automóvil (carrocería, paneles interiores, elementos de mando, cabinas de vehículos industriales, carrozados frigoríficos, etc.)
- Ferrocarril (testeros, cuadros de mando, etc.)
- Otros sistemas de transporte
- Fabricación de maquinaria (cojinetes, engranajes, poleas, anillos, juntas, sellos, válvulas, sistemas de desplazamiento lineal, arandelas de seguridad, etc.)
- Robótica
- Biomecánica
- Industria naval (estructuras y cascos de buques, veleros, etc.)
- Industria militar (vehículos blindados, cascos, tubos lanza misiles, etc.)
- Energía (turbomaquinaria, turbinas de túneles de viento, aerogeneradores, torres de transporte, etc.)
- Construcción e ingeniería civil (puentes, fachadas de edificios, piscinas, etc.)
- Industria del petróleo (estructuras diversas, accesorios y tuberías en plataformas petrolíferas)
- Industria química (tuberías, silos de almacenamiento, etc.)
- Electrónica (núcleos de alternador, circuitos impresos, etc.)
- Maquinaria agrícola
- Comunicaciones
- Construcción de electrodomésticos

*El Kadi* (2006) realizó una modelización del comportamiento dinámico de los materiales plásticos reforzados con fibras, incluyendo la resistencia a la fatiga y las propiedades tribológicas, recurriendo a redes neuronales.

Como consecuencia de las propiedades y aplicaciones potenciales enumeradas, existe una gran necesidad de conocer los procesos de fabricación, en particular los procesos de mecanizado de estos materiales compuestos.



## 2.2. Mecanizado

Los materiales mecanizados más comúnmente en esta categoría son los plásticos reforzados con fibras de vidrio (GFRP's) y los plásticos reforzados con fibras de carbono (CFRP's), y el mayor número de trabajos de investigación se centran en ellos.

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. El mecanizado 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 las dimensiones deseadas. En los últimos años, ha crecido el interés por el mecanizado 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 (*Caprino y Tagliaferri, 1995; Caprino et al., 1998; Mathew et al., 1999-a y 1999-b*).

El torneado es una de las operaciones de mecanizado más utilizadas en la industria para producir una gran variedad de componentes de acuerdo con estrictas especificaciones de diseño. Las superficies de los acoplamientos mecánicos para diversas aplicaciones tribológicas se consiguen en la actualidad mediante operaciones de torneado (*Petropoulos y Pandazaras, 2003*).

El proceso de mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras presenta diferencias significativas con el de los metales y las aleaciones (*Bhatnagar et al., 1995*), y el cuerpo de conocimientos teórico y experimental de los metales no es aplicable directamente. Esto es así porque los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras son anisótropos, heterogéneos y se preparan generalmente en forma laminada o extruida antes de mecanizarlos.

Los materiales compuestos contienen dos fases, con propiedades mecánicas y térmicas muy diferenciadas, que se traducen en complejas interacciones 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 (*Voss y Friedrich, 1987; Krishnamurthy, 1992; Rahman et al., 1999-a y 1999-b*).

El comportamiento del material compuesto durante el mecanizado depende de las diversas propiedades de la fibra y de la matriz, de la orientación de la fibra y del volumen relativo de matriz y fibras (*Komanduri, 1993*). Al mecanizar, la herramienta de corte encuentra

alternativamente matriz y fibras, con una respuesta a la acción de mecanizado muy diferente, lo que origina una marcha o evolución característica del mecanizado en estos materiales. El proceso de formación de la viruta puede estar basado en la fractura o en la cizalla, o en una combinación de las dos, dependiendo de la orientación de la fibra y de la geometría de la herramienta. El carácter abrasivo de las fibras puede originar un desgaste prematuro de la herramienta, por ello se recomienda siempre que sea posible utilizar herramientas de diamante policristalino (PCD) (Komanduri, 1993).

Como el material de la matriz tiene una baja conductividad térmica comparada con los metales y con otros materiales inorgánicos, se puede producir el calentamiento de la pieza durante el mecanizado. Ahora bien, es preciso tener también en cuenta que la presencia de fluido de corte puede provocar absorción en la matriz, lo que origina variación en las propiedades y, de manera especial, inestabilidad dimensional. Por ello, es aconsejable no utilizar ningún fluido de corte, circunstancia que puede limitar el mecanizado de estos materiales con parámetros de corte más exigentes.

El mecanizado de piezas pequeñas de geometría cilíndrica es importante en los procesos de prototipado y en la fabricación de micromecanismos y pequeños componentes de máquinas, robots, etc. Lu y Yoneyama (1999) describen un sistema de micro-torneado y destacan la necesidad de miniaturización de las herramientas de corte para desarrollar correctamente el proceso. Picard et al. (2003) proponen un nuevo sistema de fabricación de herramientas de corte de pequeño tamaño mediante la tecnología “sputtering”. Consiguieron fabricar herramientas de carburo de tungsteno, acero rápido y cristales de diamante con diferentes geometrías y formas, que ensayaron con buenos resultados en procesos de micro-mecanizado cilíndrico.

Los materiales compuestos de matriz polimérica exhiben una amplia variedad de modos de fallo, incluyendo fractura de la fibra, flujo plástico de la matriz, delaminación, etc. (Spencer, 1972). Además, algunas investigaciones han puesto de manifiesto que la textura superficial y los defectos de fabricación actúan en detrimento de las cargas de servicio, tanto estáticas como dinámicas (Arola y Ramulu, 1997). Por tanto, se deben considerar tanto la calidad superficial como los defectos de fabricación en el diseño de componentes de composites de matriz polimérica.

### 2.2.1. Modelos de corte

La primera investigación realizada sobre el mecanizado de plásticos reforzados con fibras fue presentada por *Everstine y Rogers* (1971), y desde entonces la mayor parte de las investigaciones dentro de este área han estado basadas en estudios experimentales. Estos investigadores formularon un modelo para la predicción de la fuerza mínima de corte para fibras paralelas con orientación  $0^\circ$ , basado en un mecanismo continuo de aproximación.

Casi 10 años después, *Koplev* (1980) llevó a cabo ensayos de corte ortogonal en el material compuesto CFRP utilizando herramientas de un solo filo. Estudió el proceso de formación de la viruta y la superficie mecanizada mientras mecanizaba el material unidireccionalmente. Las pruebas se llevaron a cabo cuando la dirección de corte era paralela o perpendicular a la orientación de la fibra. Encontró que la calidad superficial obtenida en el mecanizado dependía de la orientación de la fibra, obteniéndose superficies más lisas cuando la dirección de corte era paralela a la dirección de las fibras. Puso de manifiesto que la fuerza de fricción causada por la herramienta al interaccionar sobre las fibras es la que origina el fallo por tracción de éstas. El mecanizado en dirección perpendicular causaba mayor rugosidad, con una capa de material revuelto en la superficie, donde estaban presentes tanto restos de matriz como de fibras arrancadas.

En un trabajo posterior, *Koplev et al.* (1983) estudiaron la relación entre las fuerzas de corte, el mecanismo de formación de la viruta y la geometría de la herramienta. Encontraron que la fuerza de corte principal era proporcional a la profundidad de corte y disminuía ligeramente con un aumento en el ángulo. Sin embargo, pusieron de manifiesto que ocurría una reducción grande en la fuerza de avance cuando el ángulo se aumentaba de  $3$  a  $15^\circ$ . Sugirieron que esto era porque la fuerza era proporcional al área de contacto entre la herramienta y la pieza. También evidenciaron que la fuerza de corte era independiente del desgaste de la herramienta y que el incremento de la fuerza de corte se debía al aumento en la fuerza friccional entre la herramienta y la pieza, que era debida a su vez a la fuerza de avance.

*Sakuma y Seto* (1983) realizaron ensayos de torneado unidireccionales en tubos de GFRP para estudiar los efectos de la orientación de la fibra en el desgaste de la herramienta y las fuerzas de corte. Registraron procesos de formación de viruta similares a los de *Koplev*, y encontraron que a ángulos pequeños de fibra, las fibras se doblaban en primer lugar por el progreso de la herramienta y después rompían por tracción. Para ángulos de fibra grandes,

las fibras de vidrio se separaban de la superficie de corte por doblado y después se rompían por cizalladura. Explicaron la variación obtenida en las fuerzas durante el corte con diferentes orientaciones de fibra como un hecho debido a la tensión tangencial de la fibra de vidrio, que era menor que la tensión normal.

*Takeyama y Iijima* (1988) estudiaron el proceso de formación de la viruta al mecanizar plásticos reforzados con fibras continuas de vidrio y diferentes ángulos de orientación de las fibras. Propusieron un modelo para predecir las fuerzas de corte, basado en la teoría de mínima energía de *Merchant* (1945), y la calidad superficial en función del ángulo de las fibras. Comprobaron que, para un ángulo de orientación de  $0^\circ$ , la rotura tenía lugar en la dirección de la fibra, mientras que para un ángulo de  $90^\circ$  se producía la fractura de la viruta.

*Arola y Ramulu* (1997) desarrollaron un análisis de elementos finitos en dos dimensiones sobre el proceso de formación de la viruta en el caso de los composites unidireccionales. La separación de la viruta se modeló utilizando un criterio de tensión crítico basado en la resistencia de los componentes del material compuesto. El modelo fue verificado con medidas experimentales de las fuerzas de corte. Los valores medidos para la fuerza de corte concordaban con el modelo, pero la predicción de los valores de la fuerza de avance fue incorrecta debido a dificultades en la definición del plano de fractura.

*Ramesh et al.* (1998) propusieron un modelo de elementos finitos para el mecanizado de FRP's unidireccionales basado en la teoría de la plasticidad anisótropa. El material se modeló como homogéneo, aunque anisótropo, con una herramienta de corte perfectamente elástica. Utilizando las propiedades físicas y mecánicas que habían sido obtenidas experimentalmente, modelaron el proceso de formación de la viruta de diferentes materiales compuestos, entre ellos los plásticos reforzados con fibras de vidrio (GFRP's), con orientaciones de fibra de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ . Obtuvieron variaciones en las fuerzas de corte con el ángulo de fibra similares a las de *Bhatnagar et al.* (1995) y observaron que la cizalladura de la matriz era el modo de fallo predominante.

*Ribeiro y Coppini* (1999) proponen un sistema de adquisición para optimizar los procesos de corte, que tiene en cuenta el material de trabajo, la herramienta, la máquina-herramienta y las condiciones de corte utilizadas. Este sistema resulta útil para optimizar los parámetros de corte y los costes de producción.

*Mahdi y Zhang* (2001-a) propusieron un algoritmo tridimensional adaptativo de elementos finitos que permitía modelar la fibra y la matriz circundante como una celda compuesta. Presentaron también (2001-b) un modelo de corte de dos dimensiones para predecir el comportamiento de la fuerza de corte de los materiales compuestos en relación con el ángulo de la fibra.

La selección correcta de la herramienta y de las condiciones de corte (velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad de pasada) permite reducir significativamente los costes. El efecto de la geometría de la herramienta de corte y de las condiciones de operación fue evaluado por (*Wang y Zhang, 1995-a y 1995-b*), analizando la formación de viruta, las fuerzas de corte y la rugosidad. Todos estos aspectos dependen directamente de la orientación de las fibras en el material.

Estudios experimentales sobre el mecanizado de los materiales plásticos reforzados con fibras de carbono, realizados por diferentes investigadores (*Kaneeda, 1991; Wang y Zhang, 1995-a y 1995-b*) evidencian que la formación de la viruta depende fuertemente de la orientación de las fibras. Además de la orientación de las fibras, el material y la geometría de la herramienta de corte tienen también una influencia significativa en las superficies mecanizadas, en la formación de la viruta, en las fuerzas de corte y en el desgaste de la propia herramienta (*Byrne y Wunsch, 1986; Krishnamurthy et al., 1992*).

*Ramulu et al.* (2003 y 2004) llevaron a cabo estudios de caracterización del corte ortogonal de los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio y analizaron los efectos de la orientación de la fibra, los parámetros de corte, la geometría de la herramienta y la calidad superficial.

### **2.2.2. Maquinabilidad**

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

La aptitud relativa de un material al mecanizado se expresa habitualmente mediante un índice de maquinabilidad. En realidad, se trata de un patrón de maquinabilidad con relación al cual establecer comparaciones que permitan identificar la mayor o menor

facilidad/dificultad para el mecanizado. Si bien en los materiales convencionales está aceptado con claridad meridiana un patrón o índice de maquinabilidad, en el caso de los plásticos reforzados no existe un criterio reconocido universalmente, de modo que es preciso, como se desarrolla en este trabajo de investigación, profundizar en el análisis de la maquinabilidad con el fin de establecer pautas y criterios que sirvan como referencia.

La Figura 2.5. muestra los diferentes factores que afectan a la maquinabilidad de los materiales; en particular, los referentes a los parámetros funcionales de corte, las propiedades del material y la herramienta de corte.

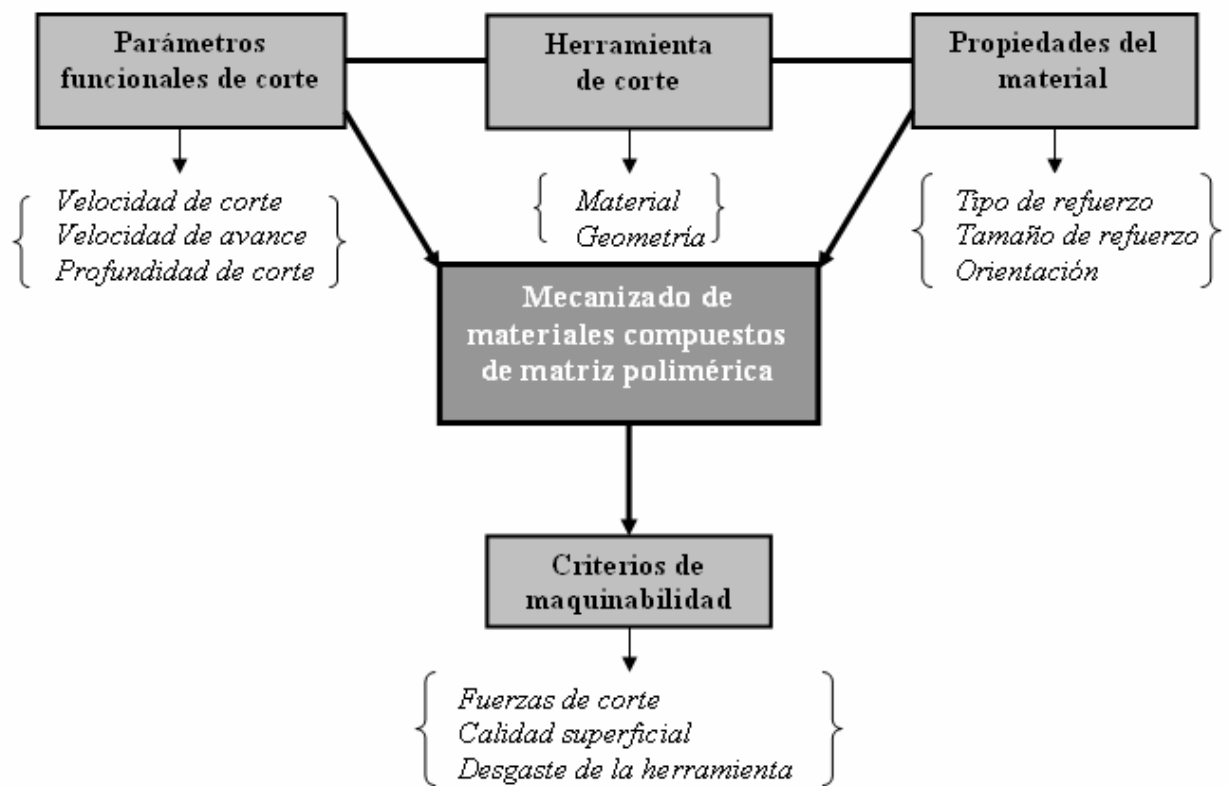


Figura 2.5. Factores que afectan a la maquinabilidad

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* (1983).

*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.

### **2.2.2.1. Propiedades del material**

Las propiedades mecánicas del material que más afectan normalmente a la maquinabilidad son la dureza y la resistencia (*El-Sonbaty et al., 2004*). Al incrementarse la dureza, aumenta el desgaste abrasivo y la vida de la herramienta se reduce. Al aumentar la resistencia del material, se incrementan las fuerzas de corte, la energía específica y la temperatura de corte, haciendo que el material sea más difícil de mecanizar.

Las propiedades físicas y térmicas de las fibras y de la matriz polimérica son diferentes y dependen en gran medida del tipo de fibra, del contenido o porcentaje de fibra, de la orientación de la fibra y de la variabilidad en la propia matriz (*Ferreira et al., 1999*). Esta circunstancia tiene una gran influencia en el comportamiento tribológico de estos materiales. Los plásticos reforzados tienen un comportamiento extremadamente abrasivo cuando se someten a procesos de conformación por arranque de viruta. La elevada resistencia mecánica de las fibras puede originar un excesivo desgaste de la herramienta de corte y un gran daño en la matriz polimérica, ya que las fibras son arracadas de la matriz.

*Rahman et al.* (1999-b) desarrollaron un estudio sobre la maquinabilidad de los materiales compuestos carbon/PEEK y concluyeron que la superficie de acabado lisa de las piezas es originada por la matriz polimérica y por la geometría de la herramienta de corte.

### **2.2.2.2. Parámetros 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*).

*Sardinas et al. (2006)*, recurriendo a algoritmos genéticos, plantearon un estudio de optimización de los parámetros de corte en el mecanizado de materiales compuestos laminados.

### **2.2.2.3. Herramientas de corte**

Los materiales para herramientas de corte más utilizados en el mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica son el diamante policristalino (PCD) y los carburos cementados (K10). Diferentes trabajos llevados a cabo en plásticos reforzados con fibras (FRP's) y compuestos termoplásticos concluyeron que las herramientas PCD presentaban mejor desempeño. Sin embargo, la principal desventaja para la aplicación de PCD es el coste, que supera en muchos casos en diez veces al coste de los carburos. Recientemente, se han desarrollado herramientas con revestimiento de diamante, que son una alternativa al PCD.

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 (*Sang-Olk et al., 1997*), de modo que es preciso recurrir a herramientas elaboradas con materiales de alta



resistencia al desgaste, elevada tenacidad y dureza en caliente (carburos cementados, diamante policristalino y revestimiento de diamante) (Groover, 1996).

La selección de la herramienta y de los parámetros de corte es, por tanto, muy importante en el proceso de mecanizado (Rahman et al., 199; Bernardos et al., 2003).

El material de la herramienta va a afectar tanto a las fuerzas de corte (fuerza de mecanizado, fuerza específica de corte, potencia de corte) como al acabado superficial.

Los carburos cementados se formulan a partir de carburo de tungsteno (WC) y se manufacturan mediante técnicas de pulvimetalurgia en las que se utiliza el cobalto (Co) como aglutinante (Groover, 1996).

La dureza extrema del diamante, su elevada conductividad térmica y bajo coeficiente de fricción hacen de él un material ideal para las herramientas de corte. El diamante se ha utilizado ampliamente en forma de inserto policristalino sobre herramienta de carburo cementado (PCD) y también en forma de diamante natural (Reineck et al., 1996; Bai et al., 2004).

El diamante policristalino se fabrica mediante la sinterización de polvos finos de cristales de diamante granulado a altas temperaturas y presiones. La utilización de las herramientas de diamante policristalino (PCD) ha ido creciendo debido a su elevada vida y acabado superficial en comparación con las herramientas de carburos cementados (Bai et al., 2004). Chambers y Bishop (1995) realizaron un estudio sobre el mecanizado del carbon/epoxi y del carbon/PEEK utilizando herramientas de carburos cementados y de diamante policristalino (PCD) y concluyeron que la herramienta PCD proporciona los mejores resultados en términos de maquinabilidad.

Se asume unánimemente que los mejores resultados de corte y calidades superficiales se obtienen con las herramientas PCD (Jahanmir et al., 1998).

La síntesis del diamante de baja presión por deposición química en fase vapor (CVD) permite procesar el diamante como capas sobre la herramienta para aplicaciones de mecanizado (Faure et al., 1999; Sheikh-Ahmad et al., 2003; Belmonte et al., 2004). El diamante de CVD puede producirse energizando un gas hidrocarburo en el hidrógeno mediante calentamiento alrededor de 2000 °C y depositando el diamante sobre un sustrato adecuado (Reineck et al., 1996; Olsen et al., 2004).

Las propiedades del diamante CVD están muy influenciadas por la estructura del grano y por tanto dependen de las condiciones de síntesis (*Sussmann et al., 1998*). Existen dificultades de adhesión de la capa de diamante al sustrato y de diferencia de dilatación térmica entre el diamante y los materiales del sustrato (*Kalpakkian y Schmid, 2002*). Los fabricantes de herramientas CVD han desarrollado diferentes procesos para depositar el diamante en cristales de diversos tamaños y rangos de espesor, desde pocas micras hasta varios milímetros dependiendo de la aplicación (*Olsen et al., 2004*).

Las herramientas de diamante CVD presentan buenas propiedades, como bajo coeficiente de fricción (por debajo de 0.05), elevada conductividad térmica (por encima de 2200 W/mK), elevada dureza a alta temperatura (6000-9000 HV) y estabilidad química (*Olsen et al., 2004*). Dado que el diamante CVD tiene mejores propiedades térmicas y químicas en comparación con el PCD, su riesgo de fractura es más bajo y por tanto se puede utilizar para operaciones de acabado en aleaciones no férreas y materiales avanzados no metálicos (*Kevin Chou y Lui, 2005*). En el caso de los materiales compuestos de matriz polimérica, el diamante depositado en capas tiene efecto positivo, porque debido a su alta dureza resiste el ataque abrasivo fácilmente, mientras por otro lado la superficie lisa del diamante muestra una reducida tendencia a la adhesión hacia los polímeros (*Köpf et al., 2006*).

El mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica requiere una excelente adhesión del recubrimiento de diamante. Si el material polimérico se pega al filo de la herramienta, aumentan las fuerzas de corte y en consecuencia se inducen tensiones adicionales en el recubrimiento. Si aumenta la rugosidad y la reducción del cobalto no está bien ajustada, se puede producir la delaminación de la capa.

Se han publicado diversos trabajos en la literatura de referencia en los que se ha estudiado el comportamiento al corte de las herramientas revestidas de diamante en el mecanizado de aleaciones de aluminio, materiales compuestos de matriz metálica, grafito y plásticos reforzados con fibras.

*Reineck et al. (1996)* llevaron a cabo un trabajo para evaluar el desempeño de las pastillas recubiertas con diamante (producidas por HCDCA - *high current DC-arc technique*) realizando pruebas en diferentes operaciones de mecanizado utilizando probetas de varios materiales, desde las aleaciones Al-Si, materiales compuestos de matriz metálica o plásticos reforzados con fibras de vidrio. Demostró evidencias de mejor comportamiento en términos de alta resistencia al desgaste y muy buena calidad superficial en comparación

con las herramientas de carburos sin recubrimiento. En comparación con las pastillas PCD, comprobó la ventaja del rompe virutas.

En contraste, el trabajo experimental desarrollado por *Davim* (2002) comparó el comportamiento de las herramientas de diamante policristalino (PCD) y las herramientas revestidas de diamante por deposición química en fase vapor (CVD) en el mecanizado de materiales compuestos de matriz metálica (A356/SiC/20p), en términos de diferentes variables, como la vida de la herramienta, la rugosidad superficial o las fuerzas de corte. Para estos materiales compuestos de reducida maquinabilidad, los mejores resultados se obtuvieron para las herramientas PCD.

*Olsen et al.* (2004) revisaron la manufactura, la microestructura y las propiedades físicas/mecánicas de la película espesa de diamante por deposición química en fase vapor (CVD) en relación con su uso para herramientas de corte. La introducción de diamante eléctricamente conductor en el recubrimiento CVD permitirá resolver algunas limitaciones de fabricación y en consecuencia se podrá esperar su mayor penetración en el mercado y la posible sustitución del PCD en algunas áreas.

*Turcheta et al.* (2005) estudiaron el comportamiento de las pastillas revestidas de diamante por deposición química en fase vapor (CVD), comparándolas con las de carburo de tungsteno tradicional, y concluyeron que las pastillas de CVD permitían reducir significativamente la fuerza de corte y el valor de la energía puesta en juego, y por tanto incrementar la velocidad de corte sin que aumenten las tensiones en la herramienta.

*Arumugam et al.* (2006) llevaron a cabo una investigación acerca del comportamiento de las pastillas con recubrimiento de diamante por deposición química en fase vapor (CVD) pulidas en comparación con las pastillas de carburos revestidas con diamante CVD sin pulir en el torneado seco de aleaciones de aluminio reforzadas. Las pastillas CVD pulidas tuvieron un mejor comportamiento en términos de reducción del desgaste de la herramienta (mejora la vida de la herramienta y reduce las fuerzas de corte) y mejora del acabado superficial de la pieza. *Fukui et al.* (2004) desarrollaron un trabajo similar para analizar el comportamiento de herramientas revestidas DLC (*diamond-like carbon*) en el mecanizado seco de aleaciones de aluminio.

*Cabral et al.* (2006) han investigado la aptitud para el mecanizado de los insertos revestidos de diamante (producidos por TMCVD - *time-modulated chemical vapour deposition process*) al tornear grafito y han comparado los resultados obtenidos con los del

diamante policristalino comercial (PCD). Los resultados han demostrado que los insertos revestidos de diamante TMCVD evidencian una mayor resistencia al desgaste que las pastillas revestidas por técnicas convencionales o las pastillas comerciales PCD. La combinación del tamaño fino de grado del diamante, la menor rugosidad superficial y la menor tensión residual otorga un mejor comportamiento al recubrimiento de TMCVD comparado con los recubrimientos de diamante convencionales y con el PCD.

*Köpf et al.* (2006) investigaron las herramientas revestidas de diamante para aplicaciones en el mecanizado de grafito, plásticos reforzados con fibras y aleaciones de aluminio, y concluyeron que es posible utilizar el diamante revestido con un comportamiento aceptable y potencial en el mercado de las herramientas.

Las herramientas revestidas de diamante, mediante deposición química en fase vapor (CVD), pueden ser claramente una alternativa económica a las herramientas de diamante policristalino (PCD) para el mecanizado de materiales avanzados (*Kevin Chou et al., 2005*).

#### **2.2.2.4. Criterios de maquinabilidad**

Se conocen diferentes criterios para evaluar la maquinabilidad; sin embargo, no existe un índice de maquinabilidad universal, en particular en el caso de los materiales compuestos. La rugosidad y la fuerza específica de corte son dos criterios importantes para evaluar la maquinabilidad de un material compuesto (*Bernardos y Vosniakos, 2003*). La rugosidad se utiliza ampliamente como índice de calidad del producto y en muchos casos como requerimiento técnico de los componentes mecánicos. La fuerza específica de corte proporciona una indicación de la eficiencia del proceso. Para obtener una fuerza específica de corte baja es necesario utilizar herramientas con insertos de diamante policristalino (PCD).

Aunque la maquinabilidad está generalmente asociada al material de trabajo, es preciso destacar que los parámetros funcionales de corte, las herramientas y el tipo de operación de mecanizado son también factores importantes que afectan a la maquinabilidad (*Groover, 1996*).

#### **2.2.2.4.1. Fuerza y potencia de corte**

El valor relativo de las fuerzas de corte tiene una importancia crucial, ya que afecta a la vida de las herramientas y es una indicación de la maquinabilidad del material. Sobre las fuerzas de corte influyen naturalmente las propiedades mecánicas del material (en particular su dureza), el porcentaje, tipo y orientación de las fibras y las características de la herramienta de corte (material, geometría, estado de la herramienta, etc.).

En cuanto a la potencia de corte, proporciona información sobre la energía que es preciso invertir en el proceso de mecanizado para conseguir eliminar el material necesario y alcanzar el acabado deseado (rugosidad, precisión dimensional, tolerancias). Por ello, es importante lograr reducir el valor de la potencia de corte, lo cual implica, lógicamente, reducir las fuerzas de corte, y obliga a intervenir sobre los parámetros funcionales de corte y sobre la herramienta. Un menor consumo de energía se traduce en un menor coste de producción.

Por otro lado, la fuerza específica de corte es un indicador más, obtenido a partir de las fuerzas de corte, muy útil para evaluar la eficiencia del proceso de mecanizado.

*Sreejith et al.* (2007) realizaron un estudio sobre el efecto de la fuerza específica de corte en el proceso de mecanizado de materiales compuestos matriz polimérica utilizando herramientas de carburos cementados. Analizando las señales de emisión acústica producidas durante el mecanizado, identificaron la existencia de una velocidad crítica de mecanizado. El estudio permitió revelar también el rango crítico de temperatura para el cual la presión específica de corte permanecía estable.

#### **2.2.2.4.2. Desgaste de la herramienta**

Existen diferentes puntos de vista sobre la vida de la herramienta de corte en el mecanizado de los materiales termoplásticos, en función de que se trate de carburos cementados o diamantes policristalinos, aunque suele haber coincidencias en cuanto a la mayor vida de las herramientas PCD (*Jahanmir et al.*, 1998).

Ciertamente, el desgaste de la herramienta se utiliza como criterio de maquinabilidad en los metales y en materiales compuestos de matriz metálica y cerámica (*Ravindra et al.*, 1993-a y 1993-b; *Bonifacio y Diniz*, 1994; *Dolinsek y Kopac*, 1999). En el caso particular de los materiales compuestos de matriz polimérica, se requieren ensayos de muy larga duración y gran consumo de material para conseguir desgastes significativos,

especialmente en el caso de las herramientas de diamante policristalino. Téngase en cuenta que tanto en el caso de los insertos de diamante policristalino o las pastillas con revestimiento de diamante, como en las herramientas de carburos cementados, se trata de materiales de alta resistencia al desgaste. Lógicamente, el desgaste se evidencia cuando se utilizan otro tipo de herramientas convencionales.

El desgaste característico durante el mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica se puede describir como superposición de dos mecanismos. Las fibras, con su elevada dureza relativa, originan desgaste abrasivo, mientras la matriz plástica muestra propiedades de adhesión extraordinarias que pueden originar el fenómeno de la delaminación y a reducir los bordes o filos cortantes de la herramienta (Köpf *et al.*, 2006).

### **2.2.2.3. Acabado superficial**

En la actualidad, crece progresivamente la demanda de componentes fabricados con materiales plásticos reforzados con fibras, debido a su precisión dimensional y a su acabado superficial (Spur y Wunsch, 1988; Palanikumar *et al.*, 2004; Palanikumar, 2006). El estudio de las superficies constituye una técnica de caracterización de los materiales muy útil en la práctica.

La rugosidad superficial es un parámetro que tiene gran influencia en el comportamiento y la funcionalidad de los componentes mecánicos y en los costes de producción (Abouelatta y Mádl, 2001; Petropoulos *et al.*, 2006-a), constituyendo una importante variable de control de la calidad. La rugosidad es crítica en los contactos mecánicos, además de otros campos, como la circulación de fluidos y las aplicaciones semiconductoras.

En la mayoría de las aplicaciones se requiere alta calidad en las superficies mecanizadas, incluyendo exactitud dimensional e integridad superficial. Por esta razón, se han llevado a cabo diversas investigaciones con el objetivo de optimizar los parámetros de corte, para obtener una determinada rugosidad (Eriksen, 1999; Abouelatta y Mádl, 2001).

Se ha demostrado que la rugosidad y el perfil de las superficies mecanizadas dependen en gran medida de la orientación de la fibra, del tipo de fibras y de la dirección de medida adoptada (Ramulu *et al.*, 1993; Cenna y Mathew, 1997; Jahanmir *et al.*, 1998). La rugosidad de las superficies mecanizadas es más sensible a las variaciones del ángulo de arrollamiento de las fibras que a las variaciones de la velocidad de avance de la herramienta (Spur y Wunsch, 1988).

Para conseguir la rugosidad deseada es necesario conocer los mecanismos de corte y desprendimiento del material y la cinética de los procesos de mecanizado, que afectan al comportamiento de las herramientas de corte (*Sreejith et al., 2000*). En general, el fallo de las herramientas de corte se produce por desgaste gradual o por fractura. El grado de desgaste de la herramienta influye en la calidad de las superficies mecanizadas. La rugosidad es el resultado de trasladar la geometría de la herramienta, combinada con la velocidad de avance, a la superficie de la pieza de trabajo (*Jahanmir et al., 1998*).

*Spur y Wunsch* (1988) estudiaron el proceso de torneado de los plásticos reforzados con fibras de vidrio (GFRP con matriz de poliéster y resina epoxy) y encontraron que la rugosidad aumentaba a medida que aumentaba la velocidad de avance y no dependía de la velocidad de corte. Por el contrario, (*Santhanakrishman et al., 1988; Ramulu et al., 1994*) obtuvieron una mayor calidad superficial al incrementar la velocidad de corte. En cualquier caso, se trata de un área con numerosos interrogantes y cuestiones por resolver.

*Kopac y Bahor* (1999) llevaron a cabo una investigación en la que fue analizada la influencia de los parámetros del mecanizado en la rugosidad. Utilizaron diseño estadístico y análisis de experimentos para evaluar esta interacción en el proceso de torneado de precisión de los metales. Esta metodología experimental también se ha aplicado por otros investigadores a los materiales plásticos reforzados.

*Bernardos y Vosniakos* (2003) presentaron diferentes metodologías y prácticas que emplearon para predecir la rugosidad superficial (diseño de experimentos, inteligencia artificial, etc.) y consideraron la influencia de los parámetros de mecanizado, de las propiedades de las herramientas de corte, de las propiedades de la pieza y del fenómeno de corte sobre la rugosidad.

Diferentes trabajos desarrollados sobre el torneado de los plásticos reforzados con fibras (FRP's) con herramientas de diamante policristalino concluyeron que la rugosidad superficial aumenta con la velocidad de avance y disminuye con la velocidad de corte, e incluyen la rugosidad como un parámetro importante de maquinabilidad para estos materiales, ya que está asociada a la calidad y a la funcionalidad de los componentes.

Una de las propiedades descriptivas de los FRP's es la anisotropía, y diferentes autores han estudiado cómo la orientación de la fibra puede influir tanto en la calidad de las superficies mecanizadas como en el desgaste de la herramienta. Cuando las fibras se cortan por

tensión, se obtienen rugosidades y fuerzas de corte más bajas aunque también aumenta el ratio de desgaste de la herramienta, que cuando se cortan por cizalladura (*Sakuma y Seto, 1983; Takeyama y Iijima, 1988; Bhatnagar et al., 1995*).

*Eriksen* (1999) desarrolló un estudio sobre la influencia de los parámetros de producción en la rugosidad superficial en el mecanizado de termoplásticos reforzados con fibras cortas y encontró un efecto prácticamente insignificante de la orientación de la fibra sobre la rugosidad.

Sin embargo, *Wang y Zhang* (2003) desarrollaron una investigación experimental acerca del corte ortogonal de los plásticos reforzados con fibras unidireccionales y concluyeron que la rugosidad superficial, la capa dañada bajo la superficie y las fuerzas de corte cambian drásticamente con la orientación de la fibra. El ángulo de orientación de la fibra,  $\theta$ , es el factor clave que determina la integridad superficial de los componentes mecanizados.  $\theta=90^\circ$  es el ángulo crítico, más allá del cual daño producido bajo la superficie es severo. Investigaciones (*Chambers y Bishop, 1995*) acerca del mecanizado de los plásticos reforzados con fibras (FRP's) y carbono/PEEK utilizando diferentes herramientas de corte, producidas de carburos cementados y de diamante policristalino (PCD) concluyeron que la herramienta de corte de PCD presenta el mejor comportamiento global.

*Davim y Reis* (2004-a) presentaron un estudio sobre la influencia de los parámetros de corte (velocidad de corte y avance) en la rugosidad y en la precisión dimensional torneando tubos de plásticos reforzados con fibras (FRP's). Utilizaron matrices ortogonales y análisis de varianza (ANOVA) para investigar las características de corte de los FRP's usando insertos de carburos cementados (K15). El objetivo era establecer una correlación entre los parámetros de corte y la rugosidad y la precisión dimensional para piezas de FRP's. En función de los parámetros de corte utilizados fue posible conseguir superficies con precisión dimensional adecuadas para construcción mecánica, IT 9 y 10.

*Sreejith et al.* (2000) evaluaron el comportamiento de las herramientas de diamante policristalino (PCD) durante el proceso de mecanizado y analizaron la influencia del material en el estado final de las superficies mecanizadas. Observaron una velocidad crítica de 300 m/min y un intervalo crítico de temperatura de 300-350 °C. Basándose en ensayos de desgaste de la herramienta, establecieron que la herramienta PCD se puede utilizar de



manera económica en el torneado de los materiales plásticos reforzados con fibras, ya que tiene una vida mayor y proporciona una mejor calidad superficial en las piezas mecanizadas.

El análisis experimental multi-parámetro ha permitido desarrollar mapas para el control de las superficies torneadas en el caso de metales (*Petropoulos et al., 2006-b*). En otros trabajos se aplican diferentes técnicas para predecir la rugosidad a partir de las fuerzas de corte, recurriendo a algoritmos genéticos o a redes neuronales (*Risbood et al., 2003*), (*Brezocnik et al., 2004; Núñez et al., 2006; Palanikumar et al., 2006-a – 2006-d*). Estas técnicas también se pueden aplicar a los plásticos reforzados con el fin de estudiar la influencia de las condiciones de corte en el valor de la rugosidad y predecir su valor ante ciertas condiciones de trabajo preestablecidas.

### **2.3. Síntesis**

En este capítulo se han analizado los materiales compuestos de matriz polimérica, como materiales de altas prestaciones utilizados en un número creciente de aplicaciones en diferentes sectores productivos, debido a sus magníficas propiedades y a su bajo peso, circunstancia sumamente ventajosa con respecto a los materiales convencionales y a otros materiales compuestos, lo que justifica investigar sobre su maquinabilidad.

Dado que el interés de este trabajo de investigación se centra en la definición de modelos físicos y estadísticos adecuados para el mecanizado de este tipo de materiales, se ha realizado una amplia revisión bibliográfica, que incorpora las referencias más destacadas a nivel internacional y que presenta los modelos de corte de estos materiales así como los estudios relacionados con la maquinabilidad. En relación con este aspecto, se analizan los factores que inciden en la maquinabilidad y se presentan los criterios de maquinabilidad utilizados para este tipo de materiales, prestando especial atención a las fuerzas de corte y al acabado superficial.

Con respecto a las herramientas de corte, las experiencias relatadas coinciden en general en que son las herramientas de diamante policristalino (PCD) las que permiten obtener mejores resultados (menor consumo de energía y mejor acabado superficial). Se ha destacado que, con carácter general, las operaciones de mecanizado sobre estos materiales deben realizarse sin refrigeración, circunstancia que restringe en parte la selección de los parámetros funcionales del proceso de corte.

Se ha puesto de manifiesto que para los requerimientos de acabado en muchas aplicaciones es preciso trabajar con velocidades de avance bajas y velocidades de corte medias.

Como se ha podido comprobar, las investigaciones referidas con anterioridad han estado dirigidas fundamentalmente a estudiar la maquinabilidad de los materiales compuestos de matriz termoestable, reforzados con fibras largas, y no de los de matriz termoplástica, reforzados con fibras cortas. Por ello, el objetivo de este trabajo de investigación es aportar resultados y conclusiones sobre la maquinabilidad de los materiales compuestos de matriz termoplástica y establecer los modelos de corte, aplicando criterios clásicos como el de Merchant, dado el pequeño tamaño de las fibras de refuerzo (longitud y diámetro) y la existencia de deformación plástica del material durante el proceso de corte (material “homogéneo”), que permite la formación de viruta continua.

La revisión bibliográfica ha incluido textos de solvencia internacional especializados tanto en el conocimiento de los materiales plásticos reforzados como en su procesado y desarrollo tecnológico, pero, de manera especial, se ha nutrido de artículos científicos, tal y como se refleja en el último epígrafe de la presente exposición.

Este capítulo servirá de base para abordar en lo sucesivo tanto el trabajo experimental realizado como la discusión de los resultados obtenidos y la ulterior propuesta de modelos de corte para estos materiales, tomando en consideración el conocimiento previo y los resultados de la experimentación llevada a cabo.

# Capítulo 3

## 3. Trabajo experimental.

### 3.1. Generalidades

### 3.2. Materiales ensayados

#### 3.2.1. Preparación de las probetas

### 3.3. Máquinas y herramientas

#### 3.3.1. Torno CNC

#### 3.3.2. Herramientas de corte

#### 3.3.3. Parámetros funcionales de corte

##### 3.3.3.1. Corte ortogonal

##### 3.3.3.2. Efecto de la profundidad de pasada.

##### 3.3.3. Empleo de herramientas de diamante revestido con rompe virutas.

### 3.4. Técnicas experimentales de caracterización

#### 3.4.1. Fuerzas de corte

#### 3.4.2. Virutas

#### 3.4.3. Rugosidad superficial

#### 3.4.4. Desgaste

### 3.5. Síntesis

# Capítulo 3

## **3. Trabajo experimental.**

### **3.1. Generalidades**

Cualquier investigación fundamental o aplicada en el campo del mecanizado por arranque de viruta tiene gran importancia de cara al desarrollo de la industria, en particular la industria de componentes mecánicos, donde la precisión dimensional y la calidad de acabado son fundamentales. En el ámbito del mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica, especialmente los de matriz termoplástica de altas prestaciones, existen algunos trabajos de investigación encaminados a determinar las condiciones de corte apropiadas, son más numerosos los estudios sobre caracterización de estos materiales (propiedades y aplicaciones) y en cambio, sólo se han datado escasas investigaciones con el objetivo de definir el modelo de corte y la maquinabilidad de los mismos. Por ello, este trabajo de investigación entronca en una línea de estudio de gran interés e intenta aportar

luz sobre cuestiones fundamentales, con incidencia directa en la utilización de estos materiales a escala industrial. En efecto, la industria necesita un mayor conocimiento acerca de las propiedades y de los procesos de transformación, entre ellos los procesos de mecanizado, de los materiales avanzados, para poder incorporarlos a nuevos diseños de productos, optimizando todos los recursos puestos en juego. En este sentido, entendemos que ha de darse una interrelación entre investigación aplicada, diseño y manufactura industrial, desde un enfoque de ingeniería concurrente.

La experimentación en el dominio de la tecnología de mecanizado por arranque de viruta exige la disponibilidad de determinado equipamiento para la adquisición de las fuerzas de corte, la caracterización del acabado superficial, la observación del desgaste de la herramienta, etc. Junto a ello, es imprescindible recurrir a diferentes técnicas de análisis de datos con la ayuda de sistemas informáticos.

Este trabajo de investigación se ha desarrollado en el seno del grupo “Machining and Tribology Research Group (MACTRIB)” del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Aveiro (Portugal). Los ensayos experimentales se han llevado a cabo en las dependencias del laboratorio de “Tecnología Mecánica”.

En este Capítulo se describen los materiales y el equipamiento utilizados, así como la metodología aplicada en la realización de este trabajo de investigación.

### **3.2. 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 la actualidad, las investigaciones básicas realizadas en tecnología de materiales han permitido procesar materiales termoplásticos que reúnen propiedades y desempeños excelentes en buen número de aplicaciones, y constituyen uno de los mayores focos de atención de la investigación aplicada, especialmente en lo referente al mecanizado por arranque de material.

En concreto, los materiales compuestos de matriz polimérica utilizados en los ensayos son los siguientes:

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

Todos los materiales han sido fabricados por la compañía ERTA®.

Tanto el PEEK natural como el PEEK GF30, reforzado con fibras de vidrio, y 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.).

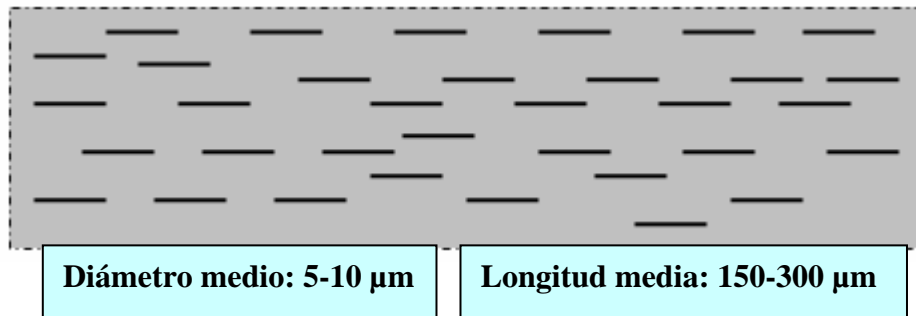
La Tabla 3.1 refleja las propiedades mecánicas y térmicas de los cinco materiales ensayados.

Tabla 3.1- Propiedades de los materiales ensayados (ERTA®)

Propiedad	PEEK	PEEK GF30	PEEK CF30	PA 6	PA 66 GF30	Unidad
Módulo de elasticidad (E)	4400	6300	7700	1400	3200	MPa
Dureza Rockwell	M105	M99	M102	M85	M76	-
Resistencia al impacto	Sin fractura	35	35	Sin fractura	50	KJ/m <sup>2</sup>
Temperatura de fusión	340	340	340	220	255	°C
Densidad	1.31	1.51	1.41	1.14	1.29	g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica (<150°C)	50x10 <sup>-6</sup>	30x10 <sup>-6</sup>	25x10 <sup>-6</sup>	90x10 <sup>-6</sup>	50x10 <sup>-6</sup>	m/m/k
Coefficiente de expansión térmica (>150°C)	110x10 <sup>-6</sup>	65x10 <sup>-6</sup>	55x10 <sup>-6</sup>	105x10 <sup>-6</sup>	60x10 <sup>-6</sup>	m/m/k

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, circunstancia que además permite obtener, según se verá más adelante, virtudes “continuas”, siempre y cuando se verifiquen ciertas condiciones. La Figura 3.1. muestra en

esquema la distribución y orientación de las fibras en la matriz e indica las dimensiones medias de las mismas.



*Figura 3.1. Dimensiones características de las fibras de refuerzo cortas*

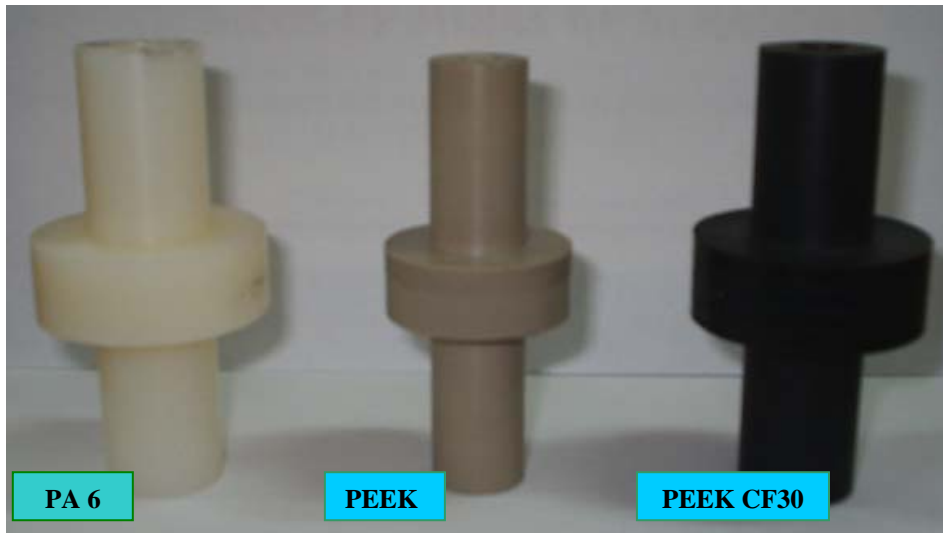
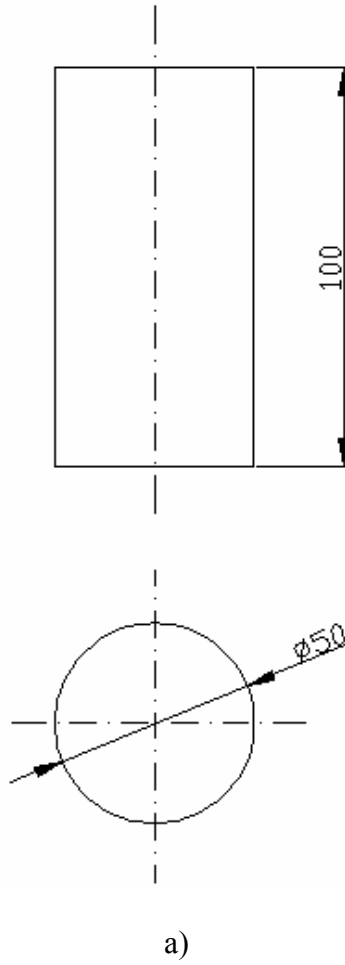
Por tanto, se trata de dos familias de materiales poliméricos de matriz termoplástica: las poliamidas, materiales más estudiados y con más referencias en el campo de la investigación aplicada; y las poli (éter-éter-cetonas), grupo de materiales avanzados de altas prestaciones, cuyo uso se encuentra en constante evolución y con prometedoras expectativas de cara al futuro en muchos sectores de aplicación. En todo caso, se trata de materiales para los que es preciso 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.

### **3.2.1. Preparación de las probetas**

Dado que el objetivo de este trabajo de investigación es estudiar el proceso de torneado de piezas pequeñas de materiales compuestos de matriz polimérica termoplástica para establecer, con base a la experimentación, los modelos físicos y estadísticos de corte de estos materiales, 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 3.2.):

- longitud: 100 mm
- diámetro inicial: 50 mm





b)

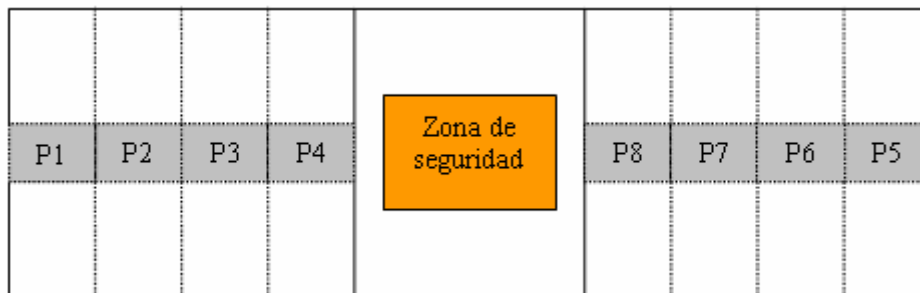
Figura 3.2 Probetas de trabajo: a) Dimensiones,

b) Ejemplos de probetas ensayadas

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 3.3. muestra la identificación de las pistas y de la zona de seguridad.



a)



b)

Figura 3.3 – Planteamiento de ensayos sobre las probetas: a) Esquema, b) Probeta tipo

La disponibilidad de 8 pistas (4 + 4) permitió efectuar, en idénticas condiciones (diámetro, revoluciones) los ensayos para los diferentes parámetros de corte establecidos, según se verá más adelante, y su correspondiente repetición, invirtiendo la fijación de la probeta.

Para garantizar la rigidez suficiente de las piezas, impidiendo la aparición indeseada de vibraciones e incluso la propia rotura de éstas, es importante estudiar la esbeltez mecánica, de acuerdo con los criterios y recomendaciones fijados en la Norma ISO 3685/1993. Esta norma define la relación:

$$E = \frac{L}{D} \quad (3.1)$$

siendo:

L: longitud de la pieza sometida a esfuerzo de flexión y pandeo (fuerzas de corte), que equivale a la distancia entre los apoyos (extremo de fijación en la mordaza y contrapunto).

En nuestro caso,  $L = 60 \text{ mm}$

D: Diámetro de la pieza (variable según avanzan los ensayos)

De este modo, la relación inicial queda establecida en  $E = 60 \text{ mm} / 50 \text{ mm} = 1.2$ . Considerando P la profundidad de pasada, la realización de una pasada supone una reducción de  $2 \cdot P$  en el diámetro de la probeta, circunstancia que es preciso tener en cuenta para no alcanzar el límite máximo de esbeltez, que establece la Norma en 10. Llegará un momento en el que, como es obvio, la probeta quedará inutilizada y será preciso continuar con una nueva.

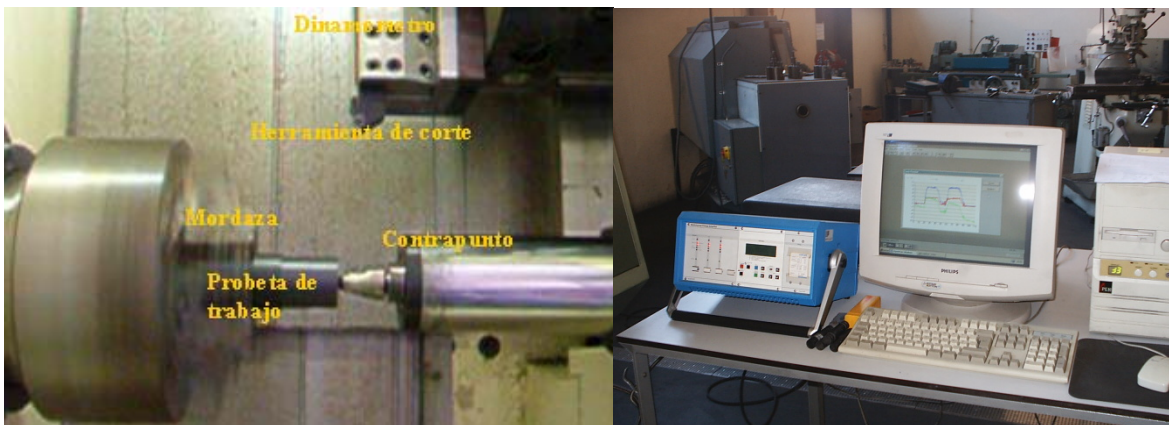
### 3.3. Máquinas y herramientas

#### 3.3.1 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 3.4.).



a)



b)

c)

Figura 3.4 - 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

El torno CNC posee un controlador Fanuc, una boca de apriete hidráulico, capaz de fijar piezas de hasta 200 mm de diámetro, una torreta para almacenamiento de las herramientas, con capacidad para 12 herramientas de corte y un contrapunto con diámetro de 70 mm activado también por accionamiento hidráulico.

En la Tabla 3.2. se presentan las principales características del equipo, facilitadas por el propio fabricante Kingsbury® .

Tabla 3.2 - Características del torno

Velocidad máxima de rotación (variación continua de la velocidad de 0 a $V_{max}$ )	4500 rpm
Potencia máxima	18 kW
Controlador	Fanuc
Peso	4000 kg
<i>Posicionamiento rápido de los ejes</i>	
Eje X	10 m/min
Eje Z	11 m/min
Recorrido longitudinal (eje Z)	550 mm
Recorrido transversal (eje X)	200 mm
<i>Torreta</i>	
Herramientas de corte (internas y externas)	12
Tiempo de indexación	1.2 s
<i>Mordaza</i>	
Peso máximo	50 kg
Dimensiones de la probeta	$\Phi 50 \times 100$
Distancia máxima entre mordaza y contrapunto	500 mm
Accionamiento	Hidráulico
<i>Contrapunto</i>	
Diámetro	72 mm
Accionamiento	Hidráulico

Todos los ensayos se realizaron de acuerdo con una rutina de cilindrado exterior, previamente programada en la máquina, dejando como variables libres el diámetro de la probeta y las condiciones de corte.

### 3.3.2. Herramientas de corte

Una vez seleccionados los materiales, es preciso elegir y adquirir el tipo de herramienta adecuado para su mecanizado. Para ello, se han seguido principalmente las indicaciones de la bibliografía, dado que la experiencia de los fabricantes de herramientas en la selección de materiales y geometrías de corte para el mecanizado de materiales compuestos de matriz polimérica es generalmente escasa, al tratarse de materiales en investigación y desarrollo, con incipiente aplicación a escala industrial.

En los ensayos de corte ortogonal y de verificación del efecto de la profundidad de pasada, se han utilizado herramientas de carburos cementados (K10) y de diamante policristalino (PCD). En las series de ensayos para verificar los efectos de la geometría de la herramienta y del rompe virutas, se han utilizado herramientas CVD (pastilla de carburo cementado con revestimiento de diamante por deposición química en fase vapor) y carburos cementados (H10). Se trata de herramientas pequeñas, en concordancia con el tamaño relativo de las piezas que se pretende mecanizar.

La Tabla 3.3. recoge la identificación y geometría de cada uno de los tipos de herramientas de corte utilizados en el trabajo experimental:

Tabla 3.3 - Identificación y geometría de las herramientas utilizadas en los ensayos

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
CVD	DCGX 11T3 04-AL	Sí	7	20	0.4	93	0
H10	DCGX 11T3 04-AL	Sí	7	20	0.4	93	0

*PCD: diamante policristalino, K10: carburo cementado, CVD: recubierta de diamante, H10: carburo cementado con rompe virutas,  $\gamma$ : ángulo de posición,  $\chi$ : ángulo de ataque,  $r_p$ : Radio de punta,  $\lambda$ : ángulo de inclinación,  $\alpha$ : ángulo de arista de corte*

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 3.5 presenta los diferentes tipos de pastillas utilizados en los ensayos.

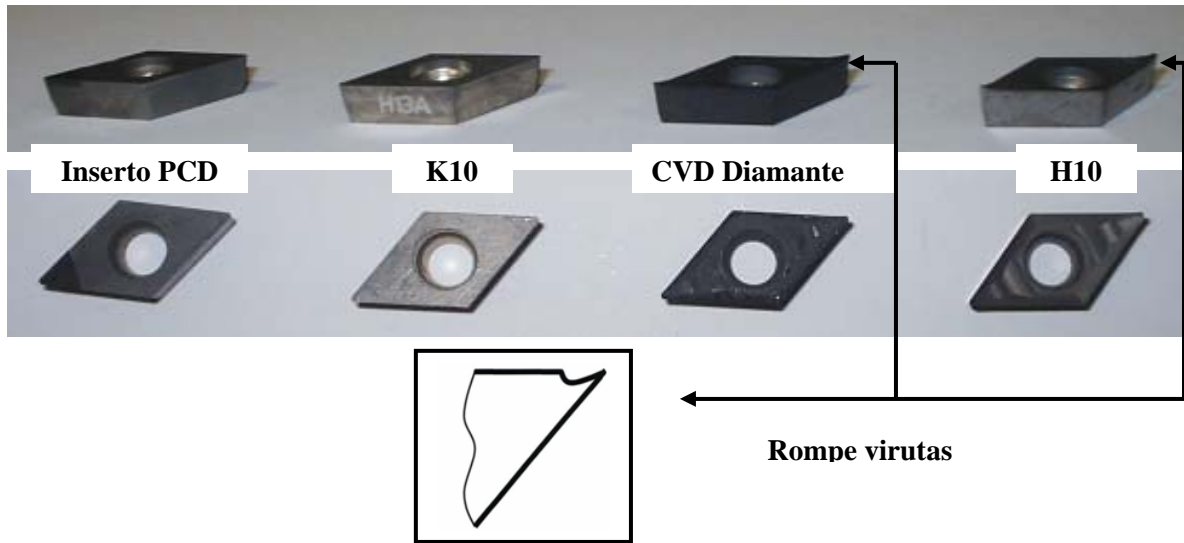


Figura 3.5 - Herramientas utilizadas en los ensayos

Se ha utilizado un portaherramientas tipo SDJCL 2020 K11 (Sandvik), según se aprecia en la Figura 3.6.

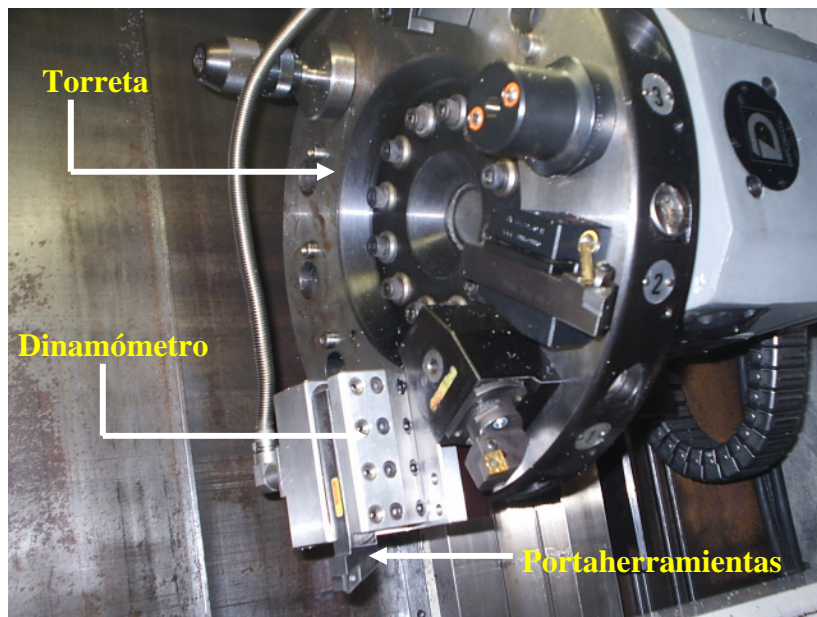


Figura 3.6 – Detalle de fijación del portaherramientas utilizado en los ensayos

Recurrir a herramientas provistas de rompe virutas está justificado en tanto en cuanto su acción favorece la salida de la viruta de la zona de corte, lo que generalmente se traduce en una reducción de las fuerzas de corte y en una mejora del acabado superficial, ya que la presencia de la viruta enrollada puede dañar las superficies recién mecanizadas. Las

pastillas con rompe virutas no son planas, tienen un ángulo de ataque de 20°, circunstancia que debe afectar a la maquinabilidad de los materiales.

### 3.3.3. Parámetros funcionales de corte

A continuación se presentan el conjunto de parámetros funcionales de corte empleado en el desarrollo de la investigación, en particular la velocidad de corte, la velocidad de avance y la profundidad de pasada.

Se efectuó una serie principal de ensayos, correspondiente al corte ortogonal, con el objetivo de obtener resultados que permitieran definir los modelos físicos y estadísticos que caracterizan el mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica termoplástica. Posteriormente, se realizaron series de ensayos específicos para verificar ciertos efectos importantes, como se detallará en lo sucesivo.

Todos los ensayos se han desarrollado sin refrigeración, dado que la utilización de fluidos de corte (en particular líquidos) podría provocar absorción en la matriz polimérica, modificando ésta sus propiedades iniciales. En cualquier caso, no se han detectado efectos negativos derivados de esta decisión, en términos de desgaste de la herramienta o de la calidad de las superficies mecanizadas. Por otro lado, el rango de velocidades de corte utilizado, como se verá a continuación, no introduce incrementos de temperatura inadmisibles en el material, en cuyo caso sí sería obligado recurrir a algún tipo de sistema de refrigeración

#### 3.3.3.1. Corte ortogonal

En la serie de ensayos principal, correspondiente al corte ortogonal, se ha utilizado una profundidad de pasada constante de 2 mm y las velocidades de corte ( $V_c$ ) y avance ( $V_a$ ) que se reflejan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.4 - Parámetros de corte

Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$V_c$	200	200	200	200	100	100	100	100	50	50	50	50
$V_a$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.05	0.10	0.15	0.20	0.05	0.10	0.15	0.20

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)



El conjunto de ensayos se ha desarrollado contemplando las 12 combinaciones entre 3 valores de velocidad de corte y 4 valores de velocidad de avance.

Dado que sobre una probeta se pueden mecanizar 8 pistas (4 a cada lado de la zona de seguridad), se realizarán los ensayos correspondientes a una velocidad de corte y cuatro velocidades de avance, junto con sus preceptivas repeticiones (todos los ensayos están duplicados en idénticas condiciones). Para mantener constantes las condiciones de velocidad de corte a medida que se reduce el diámetro de la probeta (hasta el límite marcado por la esbeltez máxima permitida), es preciso calcular sucesivamente las rotaciones del cabezal del torno e introducir este valor en el programa CNC, de acuerdo con la ecuación:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (3.2)$$

siendo:

n: velocidad de giro del cabezal en rpm

$V_c$ : velocidad de corte en m/min

D: diámetro de la probeta en mm

De este modo, por ejemplo, se realizarán los ensayos para el material PEEK CF30 con  $V_c=100$  m/min y velocidades de avance  $V_a = 0.05, 0.1, 0.05$  y  $0.2$  mm/rev, respectivamente, se invertirá la probeta en el sistema de fijación del torno y se realizarán los ensayos de repetición con esas mismas condiciones de corte y herramienta. Antes de proseguir con la serie siguiente de ensayos, se procederá a medir las rugosidades, y así sucesivamente.

Al realizar ensayos sobre una probeta nueva, se comenzará por la velocidad máxima de corte ( $V_c=200$  m/min), continuando con velocidades decrecientes a medida que se reduce el diámetro de la probeta, para evitar excesivas fluctuaciones en la velocidad de giro del cabezal del torno.

La gama de velocidades de avance se ha seleccionado de modo que el valor máximo sea menor o igual que la mitad del radio de punta de la herramienta, siguiendo la práctica habitual y las recomendaciones del fabricante de herramientas (Sandvik).

La profundidad de corte se ha seleccionado con el fin de poder obtener virutas de ciertas dimensiones, de modo que sea posible definir el modelo físico de corte (condiciones de corte ortogonal).

Concluida la serie principal de ensayos con las herramientas K10 y PCD para los cinco materiales en estudio, se realizaron otras series de ensayos particulares para verificar determinados efectos, que se detallan en los siguientes epígrafes. Los efectos no se analizaron sobre el PEEK GF30, reforzado con fibras de vidrio, por no disponer de suficiente material para completar todos los ensayos.

### 3.3.3.2. Efecto de la profundidad de pasada.

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 3.5):

*Tabla 3.5 - Condiciones de corte utilizadas en los ensayos de verificación del efecto de la profundidad de pasada*

Ensayo	V <sub>c</sub> (m/min)	V <sub>a</sub> (mm/rev)	P (mm)
1	100	0.1	0.5
2	100	0.1	1
3	100	0.1	3

Esta serie específica de ensayos permite establecer comparaciones de resultados con la serie principal de ensayos (epígrafe 3.3.3.1.) realizados con las mismas velocidades de corte y de avance y con profundidad de pasada  $P = 2$  mm.

### 3.3.3.3. Empleo de herramientas de diamante revestido con rompe virutas.

Se realizaron ensayos para comprobar el efecto del rompe virutas en los resultados finales. Los ensayos se efectuaron con dos tipos de herramientas, H10 y CVD, estableciendo como condiciones de corte las que figuran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 - Condiciones de corte utilizadas en los ensayos  
de verificación del efecto del rompe virutas

Ensayo	$V_c$ (m/min)	$V_a$ (mm/rev)	P (mm)	Rompe virutas
1	100	0.05	2	Si
2	100	0.1	2	Si
3	100	0.15	2	Si
4	100	0.2	2	Si

Esta serie específica de ensayos permite establecer comparaciones de resultados con la serie principal de ensayos (epígrafe 3.3.3.1.) realizados con las mismas condiciones de corte y con herramientas planas.

### 3.4. Técnicas experimentales de caracterización

#### 3.4.1. Fuerzas de corte

La interacción entre la pieza y la herramienta durante el mecanizado da origen a la aparición de una fuerza de contacto, responsable del arranque de la viruta. Por lo general, para simplificar, se consideran las componentes de la fuerza de mecanizado actuando en un punto de referencia cuya posición no varía con las condiciones de corte; sin embargo, en la realidad, actúan sobre una determinada superficie de contacto. En el proceso de torneado, se define el estado de carga sobre la herramienta por las tres componentes de la fuerza de mecanizado, es decir, la fuerza de avance ( $F_a$ ), la fuerza de corte principal ( $F_c$ ) y la fuerza de penetración de la herramienta en el material ( $F_p$ ), según se puede apreciar en la Figura 3.7.

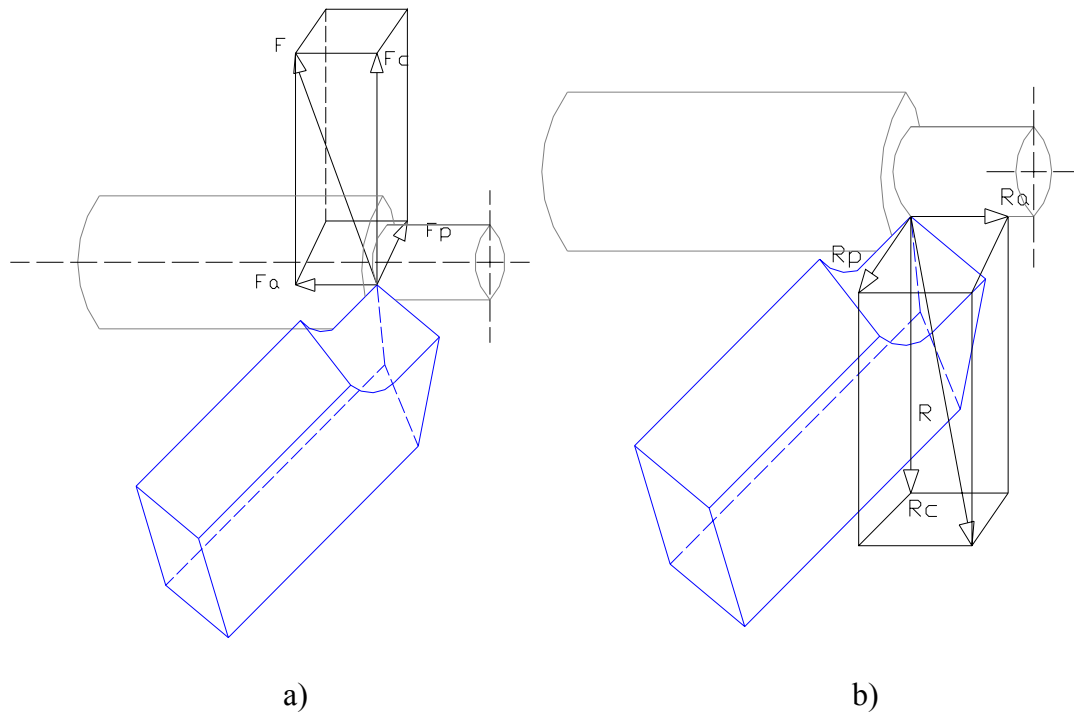


Figura 3.7 - Interacción herramienta-pieza de trabajo:

a) Componentes de la fuerza de mecanizado, b) Reacciones sobre la herramienta

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 3.8.).

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.

En la Tabla 3.7. se presentan los parámetros de calibración (dinamómetro piezoeléctrico y amplificador de carga) utilizados en los ensayos.

La adquisición de los datos se ha efectuado en tiempo real mediante el dinamómetro con interface RS 232 conectado al amplificador, que a su vez manda las señales al PC, utilizando el software Dynoware Kistler, lo que permite adquirir los datos en formato Excel (\*.xls), para su posterior tratamiento. Tanto los archivos gráficos como los de registro de las fuerzas de corte se almacenaron en soporte informático extraíble.

El portaherramientas se colocó y posicionó en el dinamómetro piezoeléctrico mediante cuatro tornillos, guardando las distancias especificadas, de acuerdo con el manual Kistler. El apriete de los tornillos se ha efectuado a través de una llave dinamométrica, aplicando

una carga de 10 N. Una vez fijado el portaherramientas, el dinamómetro se colocó en la torreta.

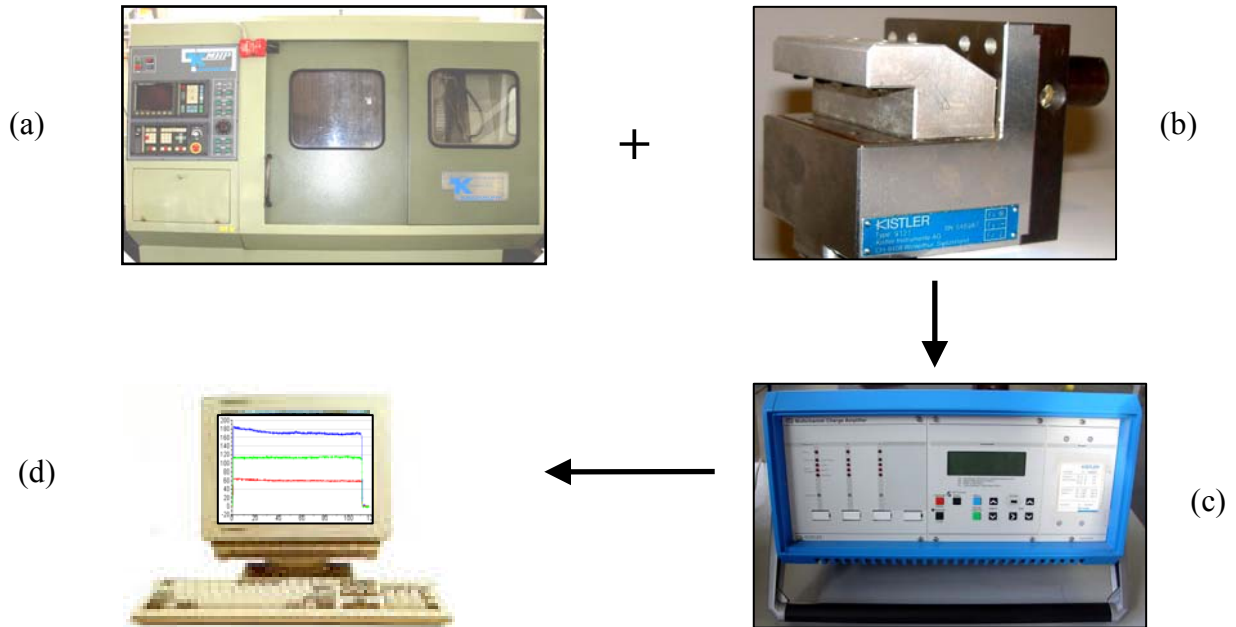


Figura 3.8 - Equipamiento utilizado en la medición de las fuerzas de corte:  
 (a) Torno CNC “MHP Kingsbury” empleado en los ensayos, (b) Dinamómetro piezoeléctrico Kistler 9121, (c) Amplificador de carga Kistler 5019, (d) Software “Dynoware Software Data Acquisition”

Tabla 3.7 - Parámetros de calibración utilizados

Fuerza	Sensibilidad del transductor (pC/N)	Gama de calibración (kN)	Linealidad (% FSO)	Filtro (Low Pass) (Hz)	Constante de tiempo
Avance	-7.93	0...3	0.3	100	Long
Corte	-3.87	0...6	0.3	100	Long
Penetración	-7.81	0...3	0.3	100	Long

La Figura 3.9. presenta un ejemplo de los resultados gráficos obtenidos en la determinación de las fuerzas de corte.

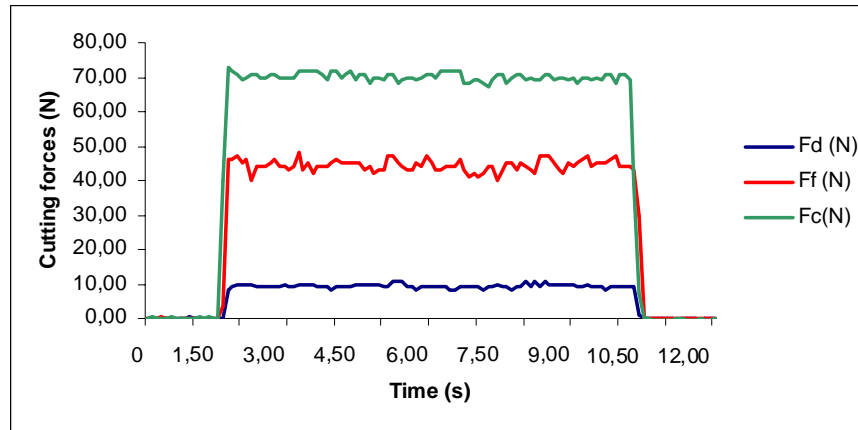


Figura 3.9. Ejemplo de fuerzas de corte obtenidas en uno de los ensayos de torneado sobre el material PEEK CF30, con herramienta K10 y parámetros de corte:

$$V_c = 100 \text{ m/min}, V_a = 0.1 \text{ mm/rev}, P = 2 \text{ mm}$$

### 3.4.2. Virutas

La caracterización de la viruta resultante del proceso de torneado para cada material, herramienta y condiciones de corte se ha efectuado mediante la Norma ISO 3685/1993 y midiendo su espesor. Si bien es cierto que la citada Norma es de aplicación para los materiales metálicos, la inexistencia de una Norma Internacional específica para los materiales compuestos de matriz polimérica nos obliga a utilizarla, aún cuando sólo como referencia. Esta Norma clasifica las virutas en 18 categorías, según se puede apreciar en la Figura 3.10.

Trabajando con los parámetros de corte adecuados, en particular con una profundidad de pasada suficiente ( $P=2 \text{ mm}$ ), se ha conseguido obtener virutas de diferentes características, aptas para proceder a medir su espesor mediante un micrómetro digital Mitutoyo®, con amplitud de  $0-25 \text{ mm}$  y apreciación de  $0.001 \text{ mm}$  (Figura 3.11.). Se han obtenido virutas continuas en el caso de los materiales sin reforzar y virutas discontinuas en el caso de los materiales reforzados, exceptuando el PEEK GF30, reforzado con fibras de vidrio.

De cada ensayo se tomó e inventarió una muestra de viruta de longitud suficiente para poder caracterizarla y medir los espesores posteriormente.

Lineal	Tubular	Espiral	Elíptica	Cónica	Arco	Partículas
L1	T1	S1	E1	C1	A1	P1
L2	T2	S2	E2	C2	A2	
L3	T3		E3	C3		

Figura 3.10 - Diferentes formas de viruta según la Norma ISO 3685/1993

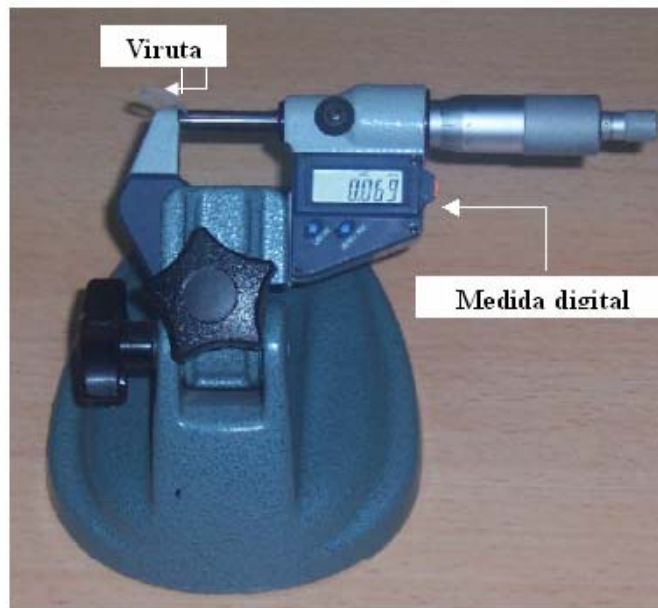


Figura 3.11 - Evaluación del espesor de la viruta mediante micrómetro digital

Para observar con más detalle la presencia de grietas en las virutas, especialmente en el caso de los materiales reforzados, se utilizó un microscopio óptico dotado con cámara fotográfica, controlado por software específico (Figura 3.12).



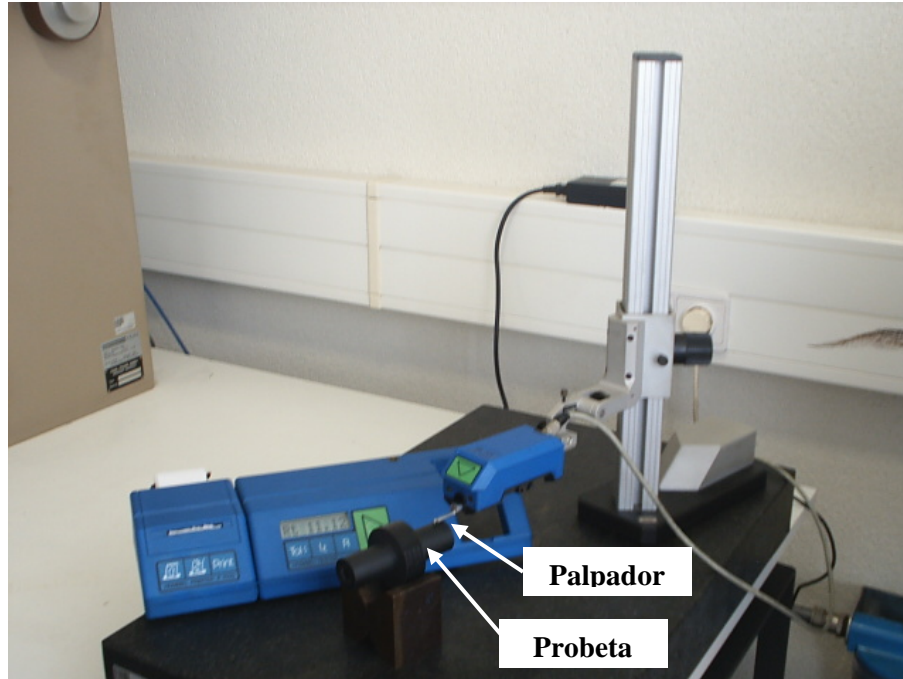
Figura 3.12 – Observación morfológica de las virutas con microscopio óptico

### 3.4.3. 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.

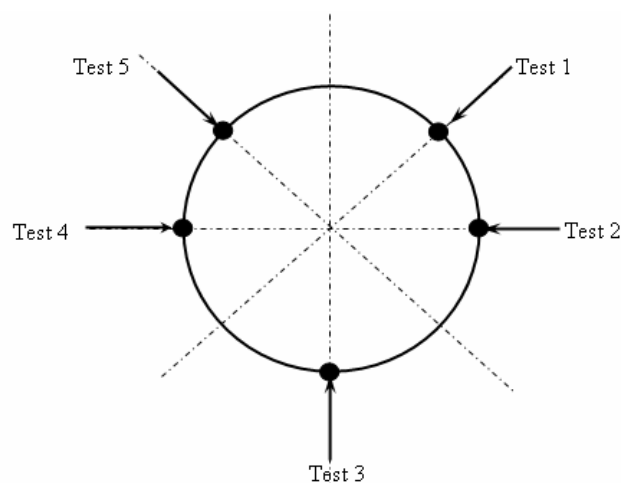
La caracterización de las superficies torneadas se ha efectuado a través de la técnica más común de análisis de microgeometría de superficies, denominada rugosimetría. Las superficies mecanizadas se han caracterizado utilizando los parámetros de amplitud siguientes:  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_p$  y  $R_q$ . Los más interesantes son sin duda alguna la rugosidad media ( $R_a$ ) y la amplitud máxima ( $R_t$ ), que serán los analizados en los Capítulos 5 y 6. Para medir los valores de los parámetros de rugosidad, de acuerdo con la norma ISO 4287/1, se ha utilizado un rugosímetro *Hommeltester – T 1000*, según se puede observar en la Figura 3.13.





*Figura 3.13 - Rugosímetro Hommeltester – T 1000  
utilizado para caracterizar las superficies*

La obtención de los valores de los parámetros de rugosidad se ha efectuado utilizando una longitud de muestreo, designada por “cut-off” ( $L_r$ ) de 0.8 mm, de acuerdo con la Norma ISO 4287/1, que corresponde con una longitud de exploración ( $L_n$ ) de 4.8 mm ( $L_n=6 \times L_r$ ). Sobre cada pista mecanizada se han realizado 5 medidas y se ha utilizado, finalmente, el valor medio en los análisis posteriores (Figura 3.14).



*Figura 3.14 – Diagrama de las 5 medidas de rugosidad realizadas  
en el perímetro de la superficie torneada*

La rugosidad media aritmética (Ra) indica el valor medio de la rugosidad en una zona de muestra. Es el parámetro de caracterización de rugosidad que más se utiliza en la mayoría de los procesos de fabricación y se determina mediante la expresión, de acuerdo con la Norma ISO 4287/1:

$$Ra = \frac{1}{L_n} \int_0^{L_n} Z(x) dx \quad (3.3)$$

siendo,  $L_n$  la longitud de evaluación y  $Z$  la distancia entre dos puntos del perfil.

La rugosidad media, como parámetro promedio, es muy significativa para las propiedades como:

- calidad del proceso de fabricación de la pieza
- desgaste de la herramienta
- estanqueidad
- rodadura

La amplitud máxima del perfil de rugosidad ( $R_t$ ) corresponde a la distancia entre el pico más alto y el valle más profundo obtenidos en la longitud de medida ( $L_n$ ), siendo independiente de los valores parciales de rugosidad. Se trata de un parámetro que, a diferencia del anterior, tiene un claro significado físico. En la Figura 3.15. se muestra que el punto más alto está situado en la longitud base  $Le_1$ , mientras que el valle más profundo se sitúa en la longitud de registro  $Le_3$ .

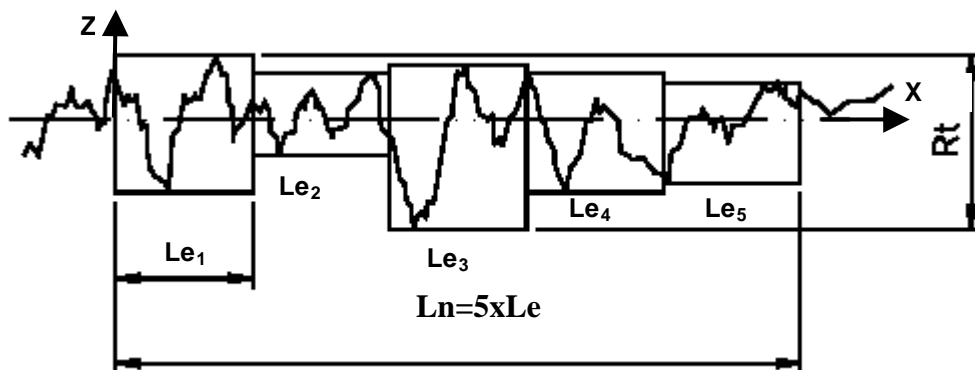


Figura 3.15 - Amplitud máxima del perfil de rugosidad  $R_t$  (ISO 4287/1)

También se midieron otros parámetros relativos a la altura de perfil, que enumeramos a continuación y cuyos valores quedan reflejados en el Anexo C.

- Altura máxima de picos ( $R_p$ ): distancia del punto más alto del perfil a la línea media (Figura 3.16).

- Desviación media cuadrática del perfil (Rq): valor cuadrático medio de las desviaciones (Figura 3.16)

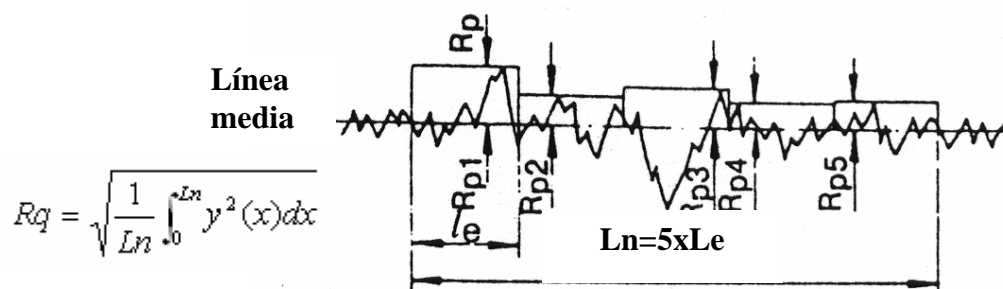


Figura 3.16 – Definición de Rq y Rp (ISO 4287/1)

La Figura 3.17 muestra ejemplos de registro de rugosidad impresos, donde se especifican tanto los valores de los diferentes parámetros como la representación del propio perfil de rugosidad.

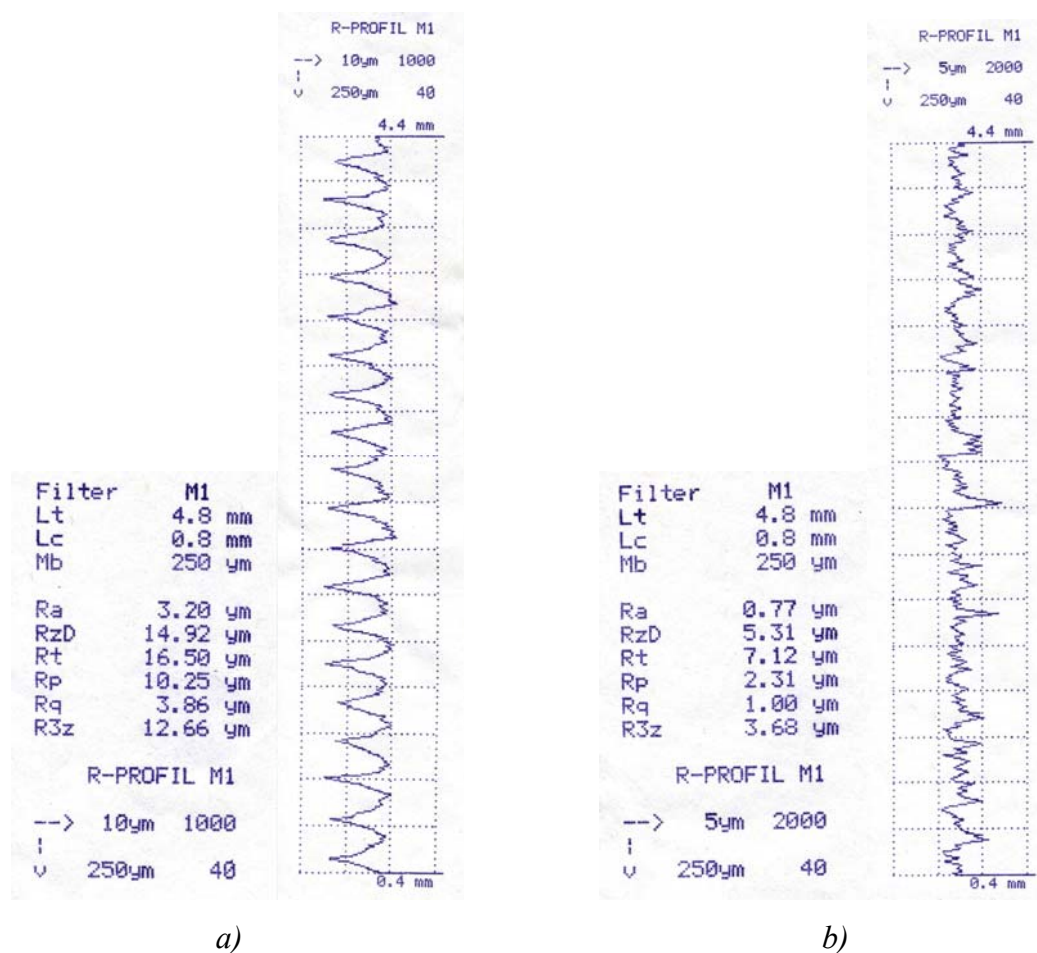


Figura 3.17 – Ejemplos de medida de la rugosidad:

- a) PA 66-GF30 mecanizada con PCD ( $V_c=100$  m/min,  $V_a=0.2$  mm/rev),
- b) PEEK GF30 mecanizado con PCD ( $V_c=200$  m/min,  $V_a=0.05$  mm/rev)

El valor de la calidad superficial (IT) se obtiene por la siguiente ecuación empírica de acuerdo con la Norma UNI ISO 3963/2:

$$IT \cong 30 \cdot Ra \quad (3.4)$$

siendo Ra la rugosidad media aritmética en  $\mu\text{m}$ .

La Figura 3.18 muestra el aspecto de las superficies mecanizadas, generalmente lisas y limpias, sin estrías visibles del mecanizado y sin rebabas en la entrada y salida de la herramienta.



*Figura 3.18 – Aspecto de las superficies mecanizadas*

#### **3.4.4. Desgaste**

Se efectuaron observaciones de las herramientas de corte al microscopio óptico (Mitutoyo) tras la realización de cada ensayo de torneado, con el fin de verificar la existencia o no de desgaste, para proseguir la serie de ensayos prevista o cambiar de punta o de pastilla. Con carácter general, no se observaron desgastes significativos y es de destacar la ausencia de desgaste en el caso de la herramienta de diamante policristalino. La lente seleccionada permite obtener imágenes con 15 aumentos y el desgaste se puede cuantificar mediante dos micrómetros digitales (Mitutoyo) de apreciación 0.001 mm (Figura 3.19).

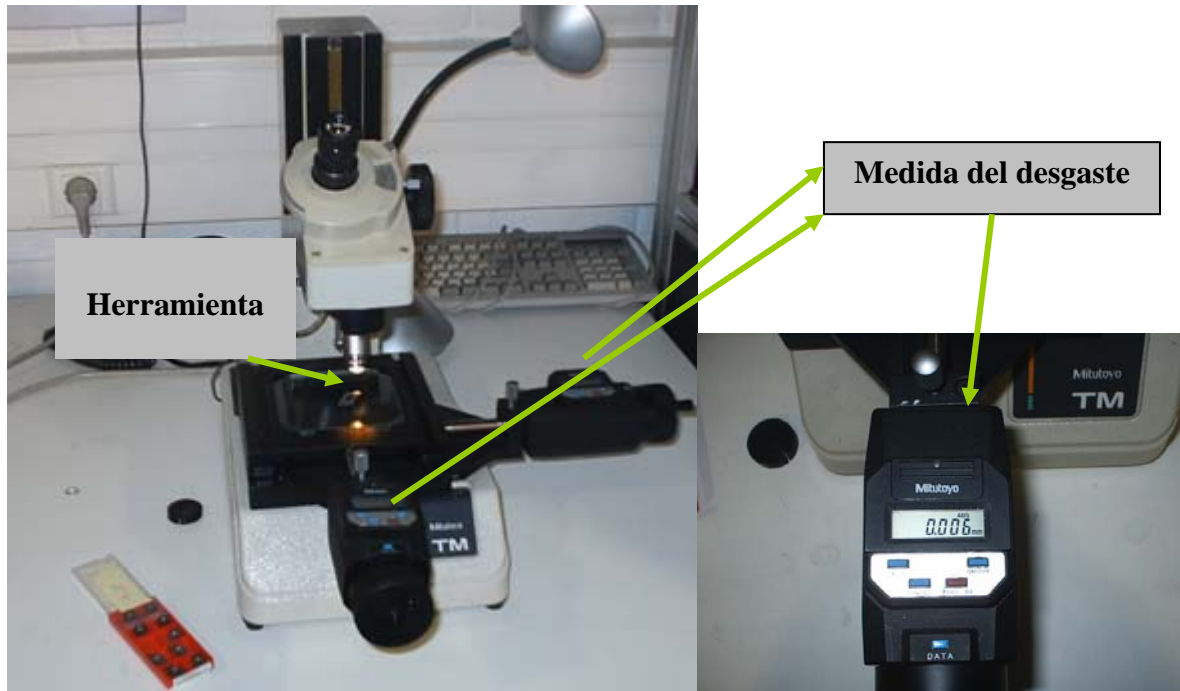


Figura 3.19 – Instrumental utilizado para la observación y medida del desgaste

Se realizaron tres medidas de desgaste en la zona central (zona B), de acuerdo con el esquema siguiente (Figura 3.20), determinándose el valor promedio de VB1, VB2 y VB3 (ISO 3685). La práctica nos indica que no era necesario realizar más medidas, dado que los valores obtenidos fueron muy próximos.

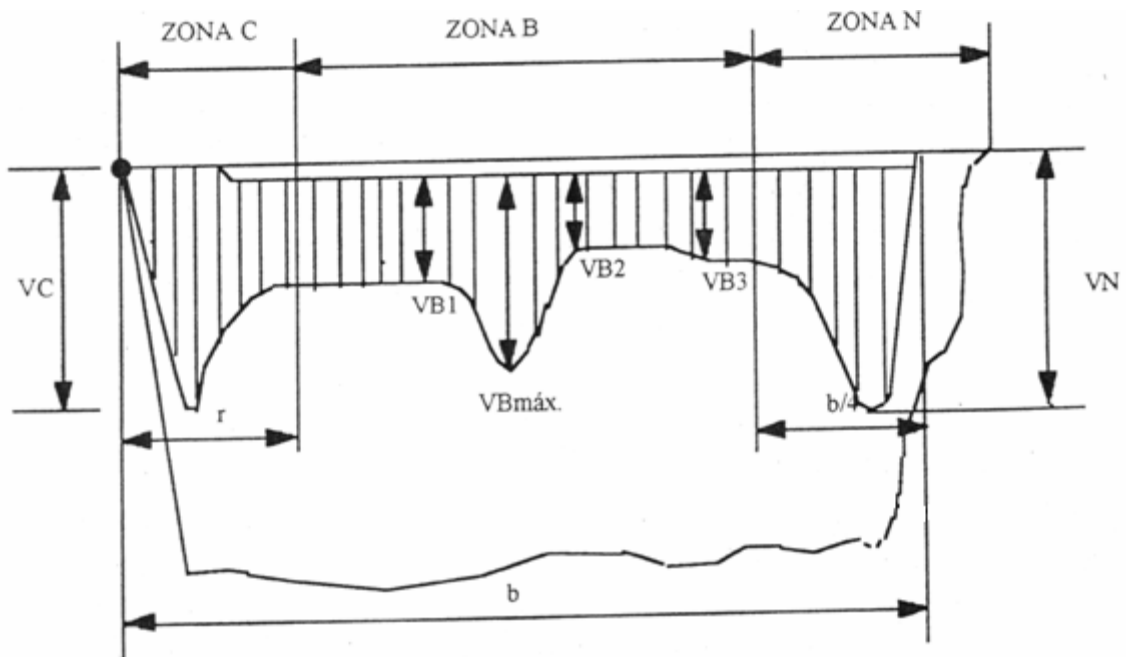


Figura 3.20 – Medida del desgaste lineal en una pastilla (según Norma ISO 3685)

### 3.5. Síntesis

Los ensayos de torneado realizados permitirán establecer, entre otros aspectos, las bases de los modelos físico y estadístico que describan el comportamiento de estos materiales ante la acción de mecanizado, en un proceso clásico como el torneado para optimizar las condiciones de corte (velocidad de corte, velocidad de avance, etc.), bajo unas determinadas exigencias de calidad. Asimismo, se analizará la maquinabilidad, recurriendo a diferentes criterios, lo que permitirá establecer un nuevo índice de maquinabilidad para estos materiales.

En una primera fase de este trabajo de investigación, se ensayaron diversos materiales compuestos de matriz polimérica (FRP's de matriz termoestable) con diferentes herramientas. Estos ensayos permitieron adquirir cierta experiencia en el manejo de determinadas técnicas, comportamiento de las herramientas, etc., fundamental para acometer con garantías el trabajo experimental posterior. Por su carácter de ensayos preliminares, no se incluyen en esta disertación. No obstante, los resultados obtenidos han sido publicados en diferentes revistas científicas (*Davim y Mata, 2004, 2005-a y 2005-b*) o presentados a congresos de relevancia en el área (*Mata y Davim, 2003, 2004-a y 2004-b*).

La serie principal de ensayos corresponde con los ensayos de corte ortogonal, utilizando herramientas planas y condiciones de corte próximas a las teóricas. La medida de las fuerzas de corte y de los espesores de viruta permitirá determinar diversos parámetros de caracterización como el ángulo de corte, el coeficiente de fricción, la deformación de la viruta y las tensiones en el plano de corte que, junto con otros cálculos, según se describe en el Capítulo 4, posibilitan la obtención del modelo físico de corte de estos materiales. Para estos ensayos se utilizaron dos tipos de herramientas (PCD y K10) y 12 pares de condiciones corte ( $V_c$ ,  $V_a$ ) con profundidad de pasada constante de 2 mm. El programa de ensayos permitirá comparar entre sí los modelos de corte de los dos grupos de materiales ensayados (PEEK y poliamidas) y con los de otros materiales convencionales, como los metales, a través del modelo teórico de Merchant.

Es preciso destacar que se trata de ensayos de mecanizado de corta duración, circunstancia que, como se ha comentado, será determinante desde el punto de vista del desgaste de la herramienta. En efecto, la corta duración de los ensayos, junto con las excelentes cualidades de las pastillas, se traducirá en una escasa o nula aparición del fenómeno de desgaste, especialmente en las pastillas PCD.

Por otro lado, se trata de ensayos sobre piezas pequeñas y con herramientas pequeñas, área en la que si bien hay algunas investigaciones realizadas, tiene grandes perspectivas de desarrollo de cara al futuro, en un contexto de progresiva reducción del tamaño (miniaturización) de los componentes.

Todos los ensayos de corte se han realizado sin refrigeración, basándonos en otras experiencias descritas en la bibliografía y en los ensayos preliminares. La presencia de refrigerante líquido puede producir absorción en la matriz polimérica, de modo que ésta modifique sus propiedades. No obstante, el hecho de no utilizar ningún refrigerante no ha originado problemas de deformación plástica en el material o inducido desgaste en la herramienta por elevación de la temperatura.

El plan experimental de ensayos realizado va a permitir analizar una serie de efectos importantes tanto en la maquinabilidad de estos materiales como en la definición de su modelo de corte. Entre ellos, destacamos:

- influencia del tipo de herramienta (carburo cementado, diamante policristalino, etc.)
- influencia del material (resina, presencia o no de refuerzo y tipo)
- efectos varios (geometría y material de la herramienta, profundidad de pasada)

La maquinabilidad se analizará en base a las fuerzas de corte (fuerza de mecanizado, potencia de corte, fuerza específica de corte) y al acabado superficial (Ra, Rt.). Se comparará la maquinabilidad para los distintos tipos de materiales y herramientas utilizadas.

Todos los ensayos se han realizado a lo largo de un período de más de 2 años. En concreto, se realizaron 400 ensayos de torneado, 2.000 ensayos de medida de rugosidad, 1.200 ensayos de medida de espesores de viruta, 400 ensayos de adquisición de fuerzas de corte, 200 observaciones al microscopio óptico (verificación de desgaste/no desgaste en herramientas) y se utilizaron un total de 24 plaquitas (40 puntas). Este número de ensayos permitió trabajar con 12.000 entradas de rugosidad, 1.200 entradas de fuerzas de corte y 1.200 entradas de espesores de viruta. A esto es preciso sumar todo el conjunto de ensayos preliminares.

Todos los ensayos de mecanizado se han repetido dos veces con el fin de verificar la reiteración de los resultados. En los cálculos y análisis posteriores se ha utilizado el valor medio.

El tratamiento informático de los resultados experimentales (hoja de cálculo Excel, software estadístico SPSS, etc.), realizado después del período de ensayos y adquisición de datos, se ha prolongado durante más de 2 años.



# Capítulo 4

## 4. Modelo físico de corte.

### 4.1. Generalidades

### 4.2. Modelo de corte ortogonal

### 4.3. Modelo de corte para materiales compuestos de matriz termoplástica

#### 4.3.1. Poliamidas

#### 4.3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

### 4.4 Discusión de resultados

# Capítulo 4

## 4. Modelo físico de corte.

### 4.1. Generalidades

El principal objetivo de esta Tesis Doctoral es la definición del modelo de corte de los materiales compuestos de matriz polimérica, en particular los materiales de matriz termoplástica, poliamidas y poli (éter-éter-cetonas) (PEEK). Una ventaja importante de los termoplásticos frente a los termoestables, que nos va a permitir definir el modelo de corte, es la posibilidad de formación de viruta, dado en el caso de los termoestables lo que se forma es polvo.

Tal y como se ha comentado con anterioridad, se trata de materiales de reciente aparición, especialmente la familia de las poli (éter-éter-cetonas), cuya introducción en el mercado es creciente y con un potencial de aplicaciones muy interesante, lo que justifica claramente investigar los procesos industriales de conformado asociados a los mismos.

Si bien existe una amplia experiencia, reflejada en abundantes referencias, sobre el mecanizado de los materiales compuestos de matriz termoestable, tal y como se ha reflejado en el Capítulo 2, en el caso de los de matriz termoplástica se han encontrado muy

pocas referencias. Por ello, es preciso avanzar en la caracterización de los procesos de mecanizado de estos materiales, dado que en numerosas aplicaciones se requiere recurrir a procesos de mecanizado con el fin de conseguir determinadas dimensiones, tolerancias y acabados superficiales.

Esencialmente, los materiales termoplásticos reforzados con fibras cortas de pequeño diámetro (por debajo de las 10  $\mu\text{m}$ ) pueden asimilarse al modelo de material homogéneo y dúctil, desde el punto de vista del mecanizado, dado que tiene lugar deformación plástica de la viruta. Por ello, se plantea la posibilidad de aplicar a estos materiales el modelo teórico de Merchant, formulado para metales, y ver en qué medida se puede aplicar, bien directamente o bien efectuando las oportunas correcciones (modelo de Merchant corregido).

En primer lugar, se presenta el modelo teórico de referencia para los metales (modelo de Merchant), definiendo todas las variables que intervienen y su determinación a partir de las fuerzas de corte y de los espesores de viruta medidos.

Sobre la base de las fuerzas de corte monitorizadas durante el proceso de mecanizado y de los espesores de viruta medidos, se calcularán una serie de relaciones importantes que permitirán definir los modelos de corte de estos materiales. Los resultados obtenidos, en términos de ángulo de corte, tensiones, deformaciones y coeficiente de fricción se compararán con el modelo teórico de Merchant. Por último, se discutirán los resultados obtenidos y la validez de los modelos propuestos.

Es importante consignar, como se verá a continuación, que los ensayos se han realizado bajo condiciones asimilables al corte ortogonal.

Con el fin de mantener una estructura uniforme para todo el documento y teniendo en cuenta el tamaño de algunas de las tablas que recogen los resultados experimentales o los cálculos efectuados, se ha preferido agruparlas en el Anexo A, según se referencia más adelante en el texto.

## **4.2. Modelo de corte ortogonal**

El modelo de corte ortogonal se puede utilizar para aproximar el torneado y otras operaciones de mecanizado en las que el avance es pequeño en comparación con la profundidad de corte (*Young y Chou, 1994; Young et al., 1994; Groover, 1996; Shet y Deng, 2000; Ceretti et al., 1999 y 2000*). Se han investigado los mecanismos de corte

ortogonal y la formación de la viruta en función de la orientación de la fibra, la geometría de la herramienta, las fuerzas de corte y el acabado superficial (Voss y Friedrich, 1987; Wang y Zhang, 1995-a; Wang y Zhang, 1995-b).

Mahdi y Zhang (2001) desarrollaron un modelo de elementos finitos para estudiar el corte ortogonal de los materiales compuestos reforzados con fibras y predecir las fuerzas de corte en función de la orientación de las fibras. Arola y Ramulu (1997) y Aref et al. (2005) utilizaron también esta técnica para simular la formación de la viruta, en función de la geometría de la herramienta y de las condiciones de fricción entre la herramienta y el material. Bhatnagar et al. (1995) estudiaron el mecanizado ortogonal de plásticos reforzados con fibras de carbono (UD-CFRP) y propusieron un modelo para predecir las fuerzas de corte.

El modelo de corte ortogonal se basa en las siguientes hipótesis (Shaw, 1984) (Figura 1):

- la arista de corte de la herramienta es perpendicular a la dirección de corte
- la superficie de corte es plana
- la profundidad de corte es constante
- las tensiones normal y tangencial a lo largo del plano de corte son uniformes

La situación de corte ortogonal está definida por un ángulo de posición de la arista de corte  $\alpha=90^\circ$  y un ángulo de inclinación  $\lambda=0^\circ$ . En estas condiciones la viruta que se forma es plana.

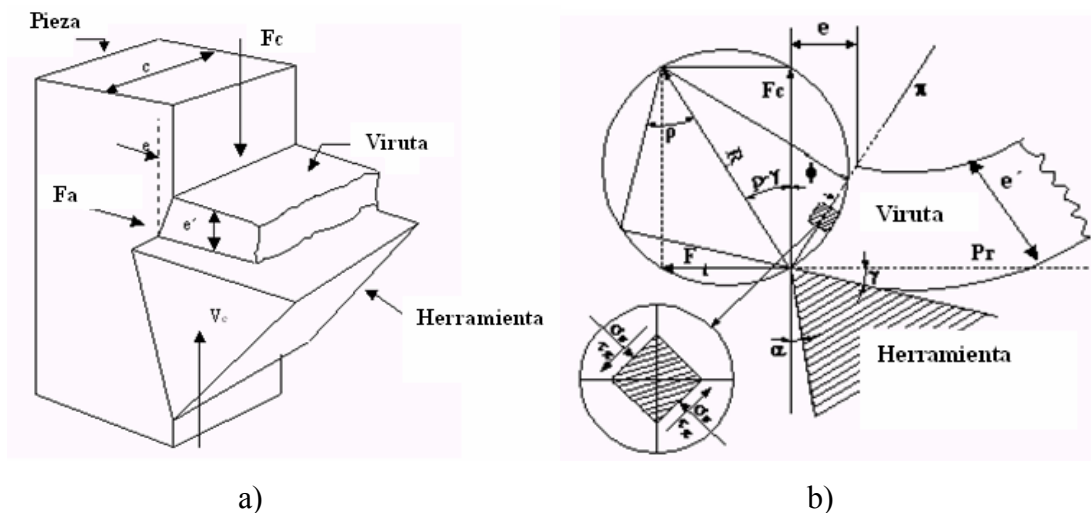


Figura 4.1- Modelo de corte ortogonal: a) Interacción herramienta-pieza y formación de la viruta, b) Detalle del plano de corte

A continuación se introducen las variables que definen el modelo de corte (Shaw, 1984;

*Boothroy y Knight, 1989; Groover, 1996).*

La relación de espesores de viruta o relación de corte (R) es el cociente entre el espesor de la viruta antes del corte o espesor teórico (e) y el espesor de viruta después del corte (e') o espesor real:

$$R = \frac{e}{e'} \quad (4.1)$$

Aunque la geometría de la herramienta no corresponda íntegramente con las condiciones teóricas de corte ortogonal, sin embargo, el proceso de corte se puede analizar bajo el modelo de corte ortogonal. Por tanto, se especifica el espesor teórico de la viruta para un ángulo de posición de la arista de corte ( $\alpha$ ) y un ángulo de inclinación ( $\lambda$ ) próximos al modelo de corte ortogonal.

La relación de espesores de viruta es inferior a la unidad, porque el espesor de la viruta después del corte es mayor que el correspondiente espesor antes del corte, debido a las condiciones de fricción existentes en el contacto viruta-herramienta y a la deformación plástica de la viruta. Consecuentemente, el espesor de la viruta depende del material y de la herramienta de trabajo, así como de los parámetros de corte.

El espesor de viruta teórico (e) se puede calcular a partir del ángulo de posición de la arista de corte ( $\alpha$ ) y de la velocidad de avance ( $V_a$ ) mediante la siguiente ecuación (*Wang y Zhang, 1995-a; Wang y Zhang, 1995-b; Davim y Mata, 2006*):

$$e = V_a \cdot \text{sen} \alpha \quad (4.2)$$

La inversa de la relación de espesores de viruta es:

$$R_c = \frac{1}{R} = \frac{e'}{e} \quad (4.3)$$

El ángulo de corte se puede calcular a partir de la relación anterior mediante la ecuación:

$$\phi = \text{arctg} \frac{\cos \gamma}{R_c - \text{sen} \gamma} \quad (4.4)$$

donde,  $R_c$  se obtiene mediante la Ec. 4.3 y  $\gamma$  es el ángulo de ataque de la herramienta.

A partir de las fuerzas de corte y del ángulo de corte, se calculan las tensiones tangenciales y normales ( $\text{N/mm}^2$ ) en el plano de corte:

$$\tau = \frac{F_c \cos \phi - F_a \text{sen} \phi}{P \cdot e} \text{sen} \phi \quad (4.5)$$

$$\sigma = \frac{F_c \text{sen} \phi + F_a \cos \phi}{P \cdot e} \text{sen} \phi \quad (4.6)$$

siendo,  $F_c$  la fuerza de corte (N),  $F_a$  la fuerza de avance (N),  $P$  la profundidad de corte (mm) y  $e$  el espesor teórico de la viruta (mm).

La deformación de la viruta se obtiene a partir de los valores de  $R_c$  y  $\gamma$ :

$$\varepsilon = \frac{1 + R_c^2 - 2R_c \text{sen} \gamma}{R_c \cos \gamma} \quad (4.7)$$

El ángulo de corte ( $\phi$ ) es el ángulo en el cual se igualan la tensión de corte con la resistencia del material y se puede determinar derivando la tensión tangencial (Ec. 4.5) respecto de  $\phi$  e igualando a cero, de acuerdo con *Ernst y Merchant* (1941):

$$\phi_M = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\rho - \gamma) \quad (4.8)$$

En el análisis de Ernst y Merchant se asume que la viruta se comporta como un cuerpo rígido que se mantiene en equilibrio por la acción de las fuerzas transmitidas a través de la interface viruta-herramienta y a través del plano de corte. La base de la teoría de Ernst y Merchant es la hipótesis de que el ángulo de corte tome un determinado valor que reduzca el trabajo realizado en el corte al mínimo. En consecuencia, para establecer las condiciones de corte, el trabajo desarrollado en el corte debe ser proporcional a la fuerza de corte, por lo que es preciso encontrar una expresión que relacione la fuerza de corte con el ángulo de corte, de modo que se pueda obtener el ángulo de corte que hace mínima la fuerza de corte. El ángulo de fricción ( $\rho$ ) y el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) se estiman a partir de las fuerzas de corte ( $F_c$  y  $F_a$ ) y del ángulo de ataque de la herramienta ( $\gamma$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = \text{tg} \rho = \frac{F_c \text{sen} \gamma + F_a \cos \gamma}{F_c \cos \gamma - F_a \text{sen} \gamma} \quad (4.9)$$

La Ec. 4.8 define la relación general entre el ángulo de ataque de la herramienta ( $\gamma$ ), la fricción entre la herramienta y la viruta ( $\rho$ ), y el ángulo de corte ( $\phi$ ). Un ángulo de corte grande se traduce en un área pequeña en el plano de corte y en consecuencia se requiere una fuerza pequeña para formar la viruta. Adicionalmente, serán necesarios valores bajos de energía de corte y temperatura (*Groover, 1996*).

En una situación más general, se debe considerar el valor de  $\delta$ , denominado “índice de maquinabilidad” o constante de Merchant, de acuerdo con la Ec. 4.10 (modelo de Merchant corregido), para calcular el ángulo de corte (*Ernst y Merchant, 1941*).

$$\phi_{Mc} = \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2}(\rho - \gamma) \quad (4.10)$$

Se conocen otros modelos, como el de Lee y Shaffer (1951), que fue el resultado de aplicar la teoría de la plasticidad al problema del corte ortogonal en los metales. Asumiendo ciertas hipótesis, aproximaron el comportamiento plástico del material durante el mecanizado debido las elevadas tensiones que tienen lugar en el proceso de corte.

La Figura 4.2 muestra la representación de las teorías de Ernst y Merchant, y Lee y Shaffer, junto con resultados experimentales en corte ortogonal para diferentes metales. Al final de este Capítulo estaremos en condiciones de ofrecer las relaciones específicas para los materiales en estudio, en comparación con la teoría de referencia de Ernst y Merchant.

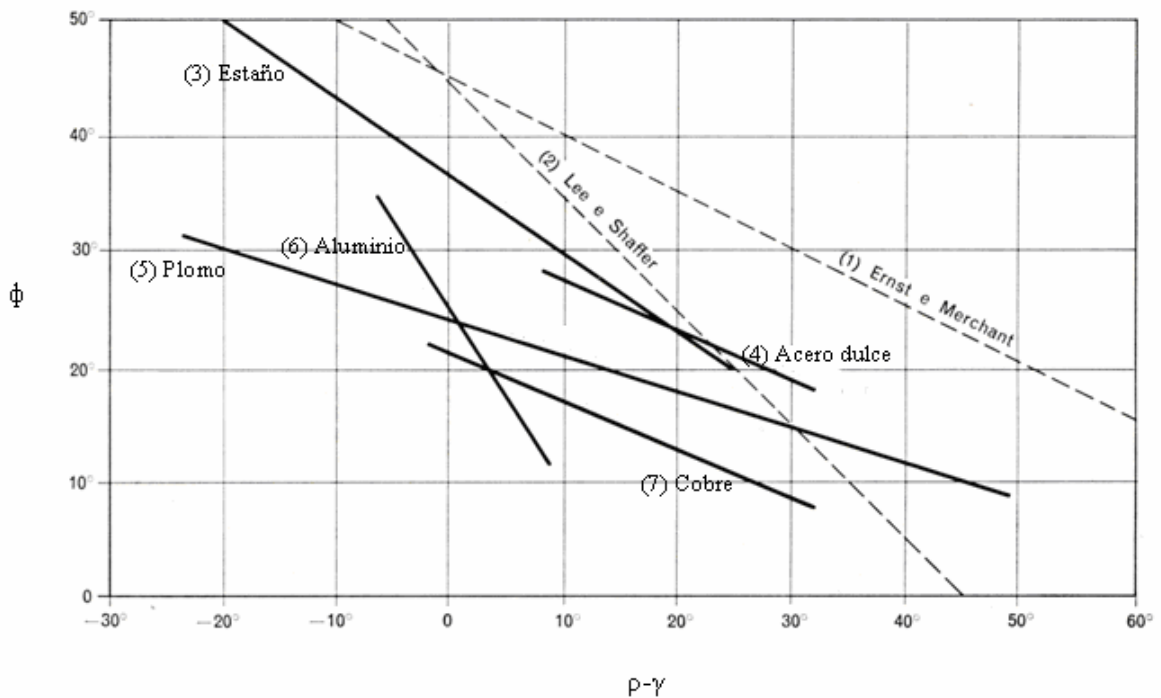


Figura 4.2 - Comparación de los modelos teóricos con resultados experimentales obtenidos en diferentes metales (Michelletti, 1977; Boothroy Knight, 1989)

### 4.3. Modelo de corte para materiales compuestos de matriz termoplástica

A partir de los valores de las fuerzas de corte y de los espesores de virutas medidos (Tablas A.1 a A.4 del Anexo A), se van a calcular las relaciones definidas en el apartado anterior, que permitirán caracterizar el proceso de mecanizado y definir el modelo físico de corte de estos materiales. En concreto, se calcularán el ángulo de corte, las tensiones en el plano de corte, la deformación plástica de la viruta y el coeficiente de fricción. Se determinarán también, para la ulterior comparación, los ángulos de corte del modelo de Merchant, teórico y corregido. Se analizará la evolución de estas magnitudes en función de los

parámetros funcionales del proceso de corte (velocidad de corte, velocidad de avance), del tipo de material (PA 6, PA 66-GF30, PEEK, PEEK CF30, PEEK GF30) y del tipo de herramienta utilizada (PCD, K10). En todos los ensayos se utilizó una profundidad de pasada constante de 2 mm. Se adoptó este valor con el fin de obtener virutas de dimensiones aceptables para efectuar las correspondientes medidas de espesor.

En los ensayos de corte ortogonal, de acuerdo con lo consignado en el Capítulo 3, se utilizaron herramientas de diamante policristalino (PCD) y herramientas de carburos cementados (K10). En otros ensayos específicos, como se comentará más tarde en el Capítulo 6, se utilizaron otros tipos de herramientas, para verificar el efecto de la geometría de la herramienta.

Por otra parte, es importante destacar que en los ensayos de mecanizado realizados en estos materiales se han obtenido generalmente virutas continuas, especialmente en el caso de los materiales no reforzados, evidenciando, como era de esperar, su ductilidad. En los materiales reforzados, la viruta se fragmentaba con más facilidad, debido a la presencia de las fibras. La obtención de virutas continuas permite conseguir mejores acabados superficiales, circunstancia de gran importancia en numerosas aplicaciones prácticas.

De acuerdo con la Norma ISO 3685, las virutas obtenidas en el mecanizado de los materiales ensayados en este trabajo no son uniformes, pudiendo clasificarse según se refleja en la Tabla 4.1.:

*Tabla 4.1 - Tipología de virutas obtenida en función del material y de la herramienta (véase Figura 2.11)*

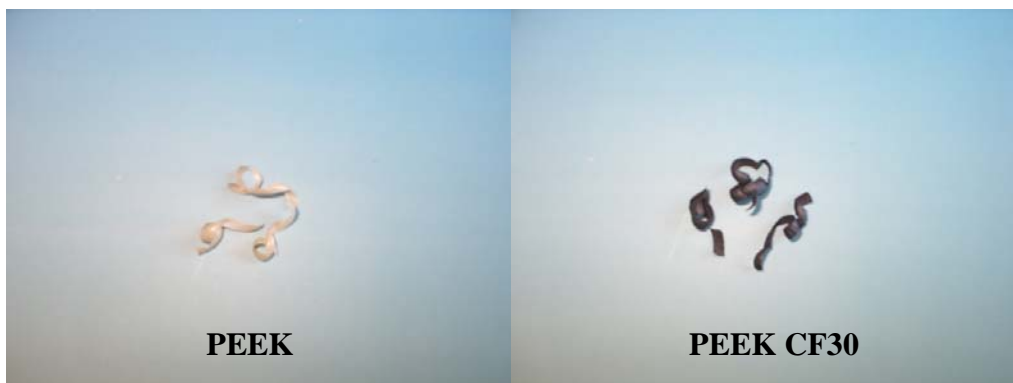
Tipo de herramienta	MATERIAL				
	PEEK	PEEKGF 30	PEEK CF 30	PA 6	PA 66-GF30
PCD	L3	L3	A1 / A2	T1	A1
K10	L3	L3	A1 / A2	T1	A1
Rompe virutas	T3	T3 / E3	A2	L2	A2



No se aprecian diferencias significativas, al menos en una primera observación, entre la forma de las virutas al variar la velocidad de corte o la velocidad de avance. Tampoco se evidencian diferencias si se mecaniza con PCD o con K10. Las diferencias se verifican únicamente en el caso de la herramienta dotada de rompe virutas. Cuando la herramienta incorpora rompe virutas aumenta el grado de enrollamiento, llegando a partir en algunos casos. En cuanto al material, también hay diferencias, según se recoge en la Tabla 3.8. Las virutas de PEEK CF30, reforzado con fibras de carbono y de poliamida reforzada con fibras de vidrio, PA 66-GF30, presentan forma de arco degradado con gran propensión a romperse, incluso sin el empleo de rompe virutas (virutas frágiles). Por el contrario, las virutas del PEEK, PEEK GF30 y PA 6 son virutas normalmente más rígidas. En general, la presencia de fibras de refuerzo tiende a debilitar las virutas y hacerlas más cortas. La Figura 4.3 muestra algunos ejemplos de virutas obtenidas en los ensayos.



a)



b)

*Figura 4.3 – Muestras de virutas: a) Herramienta PCD, b) Herramienta CVD*

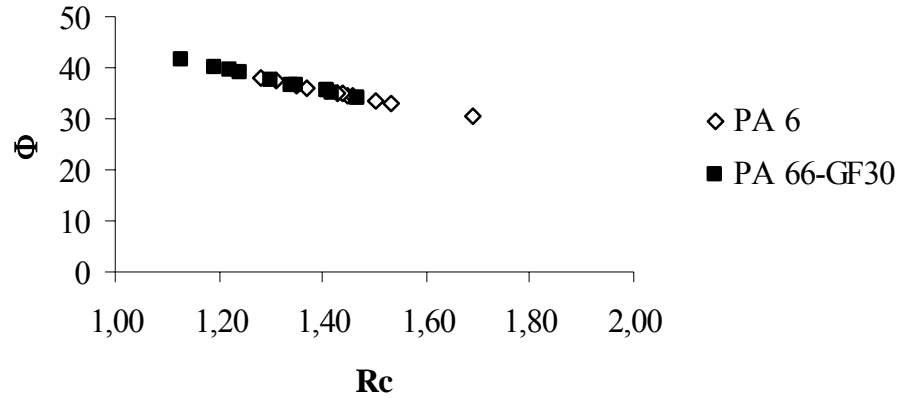
Los parámetros de corte seleccionados, en particular la profundidad de pasada, nos han permitido trabajar en condiciones de corte ortogonal y obtener virutas de dimensiones adecuadas para poder medir su espesor con el instrumental apropiado.

Los modelos físicos de corte presentados, junto con los modelos estadísticos que se abordarán en el Capítulo 5 y el estudio experimental de la maquinabilidad expuesto en el Capítulo 6, deben ser útiles para optimizar los procesos de mecanizado de estos materiales. Algunos de los resultados que se presentan a continuación, tanto para la familia de las poliamidas como para la familia de las poli (éter-éter-cetonas), ya han sido publicados en diferentes congresos y revistas internacionales (*Mata y Davim, 2005-b y 2005-c; Davim y Mata, 2006 y 2007-b; Mata et al., 2006*).

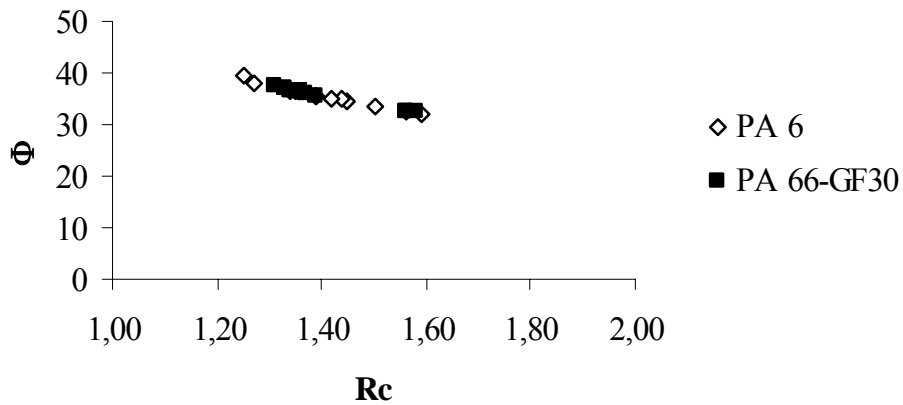
#### **4.3.1. Poliamidas**

Considerando el espesor teórico de viruta ( $e$ ) y el espesor de la viruta después del corte (espesor real) ( $e'$ ) (Tablas A.1 y A.2 del Anexo A), se calcula la relación inversa de espesores ( $R_c$ ), de acuerdo con las ecuaciones (4.1), (4.2) y (4.3). La Tabla A.5 (véase Anexo A) presenta los valores de  $R_c$  calculados, así como los valores del ángulo de corte, obtenidos a partir de la ecuación (4.4). La relación inversa de espesores de viruta ( $R_c$ ) debe ser mayor que 1.0 porque el espesor de la viruta real es mayor que el espesor teórico antes del corte, debido a las condiciones de fricción existentes en la interface viruta-herramienta y a la deformación plástica de la viruta. A partir del análisis de la Tabla A.5 se puede evidenciar el efecto de las fibras de vidrio, en particular para  $V_c=200$  m/min, que origina un aumento de  $R_c$  y una reducción del ángulo de corte ( $\Phi$ ) en el caso del material reforzado. Este hecho es muy importante porque un elevado ángulo de corte (caso de PA 6) implica un área de corte pequeña y en consecuencia, la fuerza requerida para formar la viruta es más pequeña. Adicionalmente, será necesaria una menor energía de corte y se alcanzará una temperatura de corte menor.

La Figura 4.4 presenta la evolución del ángulo de corte ( $\Phi$ ) en función de la relación inversa de espesores de viruta ( $R_c$ ) para los dos materiales estudiados. Se verifica que  $\Phi$  disminuye con  $R_c$ , de acuerdo con una evolución aproximadamente lineal.



a)



b)

Figura 4.4 - Evolución del ángulo de corte ( $\Phi$ ) en función de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ): a) PCD, b) K10

Por otra parte, la Figura 4.4 pone de manifiesto un comportamiento similar para los dos tipos de herramienta. No obstante, los datos proporcionados en la Tabla A.5 consignan valores similares en las herramientas PCD y K10 para el material no reforzado y valores más altos para PCD en el caso del material reforzado, lo cual indica que esta herramienta tiene un mejor comportamiento para este tipo de material en comparación con la herramienta K10. Un valor más alto de ángulo de corte, tal y como se ha comentado con

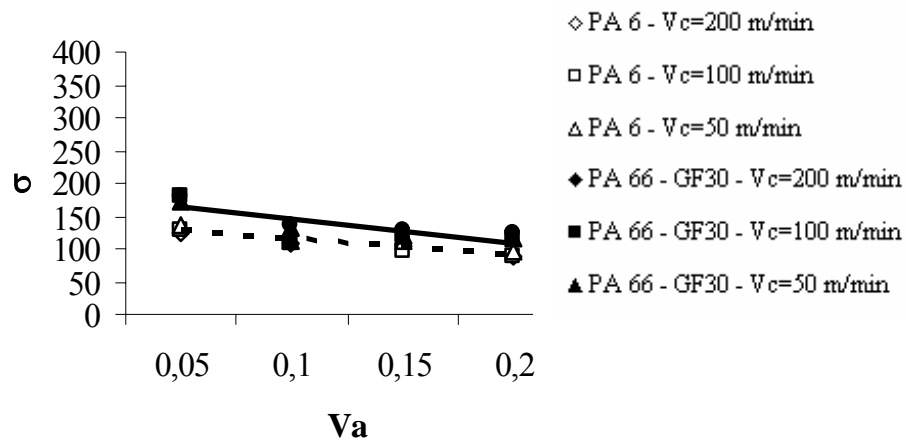
anterioridad, se traduce en un valor más bajo de la fuerza de corte y de la energía involucrada en el proceso, lo cual es obviamente deseable desde el punto de vista de la maquinabilidad.

Las Tablas A.1 y A.2 (véase Anexo A) presentan los valores de las tres componentes de la fuerza de corte registrados durante el proceso de mecanizado, en cada uno de los ensayos realizados. Como se puede comprobar, en general la fuerza de corte ( $F_c$ ) es mucho mayor que la fuerza de avance ( $F_a$ ) y que la fuerza de penetración ( $F_p$ ), correspondiendo en cualquier caso esta última al valor inferior. Por otro lado, la presencia de fibras de refuerzo se traduce en un incremento en el valor de las fuerzas de corte necesarias para materializar el mecanizado. Adicionalmente, se obtienen valores más bajos cuando se mecaniza con la herramienta PCD, para ambos materiales.

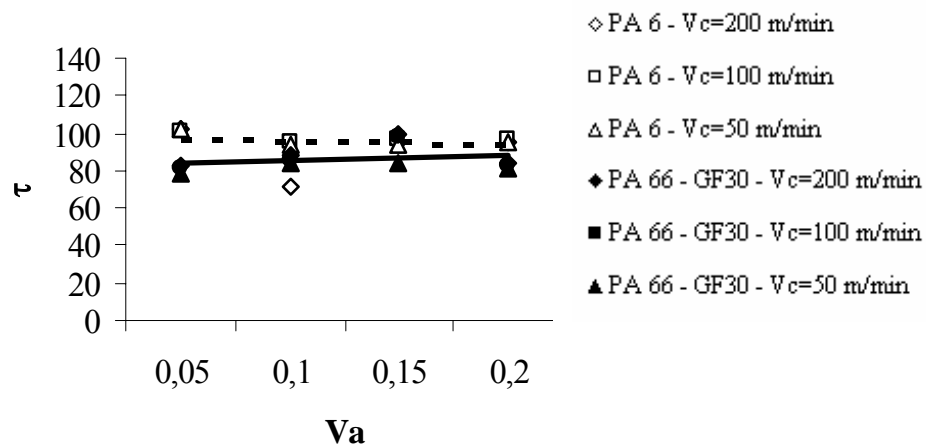
La Tabla A.6 (véase Anexo A) presenta los valores calculados de las tensiones normales ( $\sigma$ ) (Ec.4.5) y tangenciales ( $\tau$ ) (Ec.4.6), así como de la deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) (Ec.4.7) asociadas al proceso de corte.

Las Figuras 4.5 y 4.6 muestran la evolución de las tensiones normales y tangenciales ( $N/mm^2$ ) en función de la velocidad de avance (mm/rev), para las diferentes velocidades de corte y los dos tipos de herramientas. Se representan también los valores medios para cada material, con el fin de facilitar la comparación de los resultados. La tensión normal disminuye con el avance y el material compuesto PA 66-GF30 presenta valores mayores de  $\sigma$  en comparación con el polímero PA 6, debido al efecto del refuerzo. Sin embargo, la tensión tangencial no está influenciada significativamente por la velocidad de avance y el material PA 66-GF30 exhibe valores ligeramente más pequeños de  $\tau$  que el material PA 6. Como se puede observar analizando los resultados de la Tabla A.6 y de las Figuras 4.5 y 4.6, al mecanizar con la herramienta PCD se obtienen valores más bajos de tensiones de corte, en comparación con la herramienta K10, lo cual viene a confirmar el mejor comportamiento de la herramienta de diamante policristalino.

La Figura 4.7 muestra la evolución de la deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) en función de la relación inversa de espesores de viruta ( $R_c$ ) para los dos materiales estudiados. Se puede observar que  $\epsilon$  aumenta con  $R_c$ . Además, el material compuesto PA 66-GF30 presenta valores menores de  $\epsilon$ , debido a la fragilidad de las fibras de refuerzo.

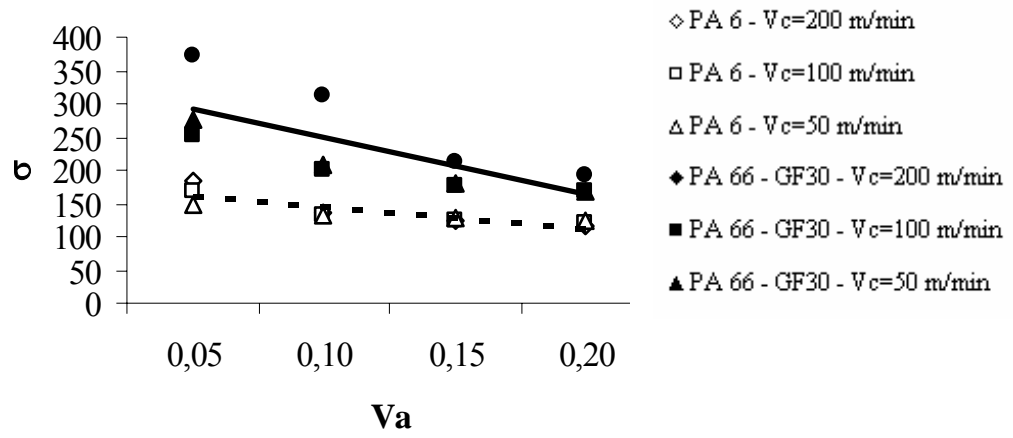


a)

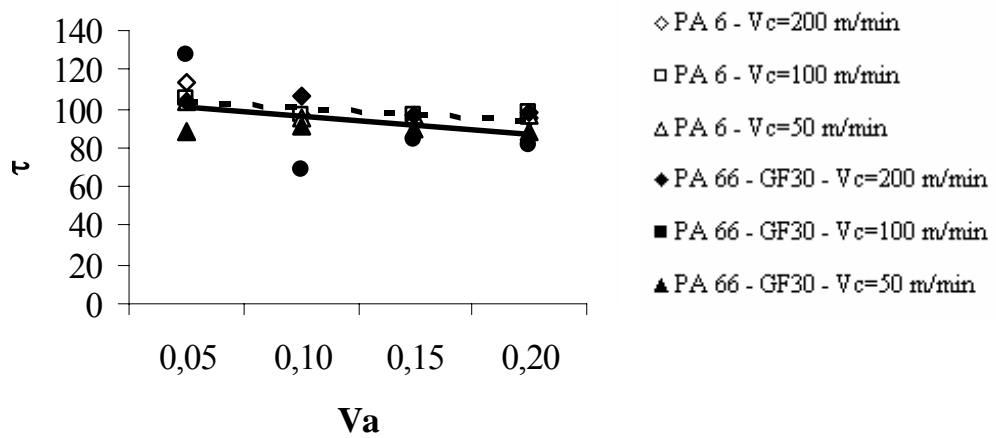


b)

Figura 4.5 - Evolução de la tensión normal (a) y de la tensión tangencial (b) en función de los parámetros de corte (herramienta PCD)

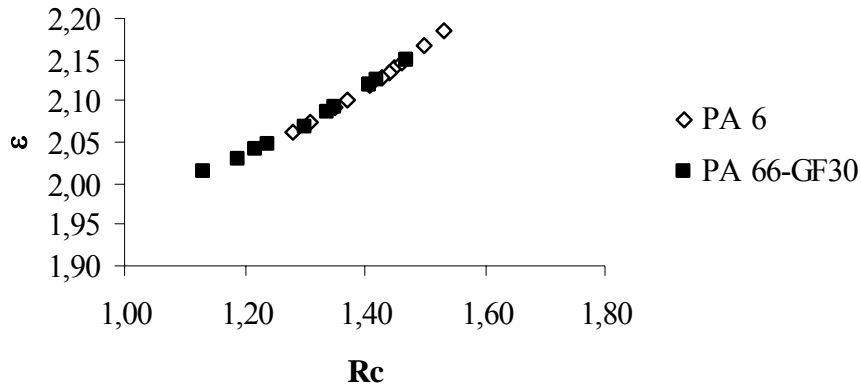


a)

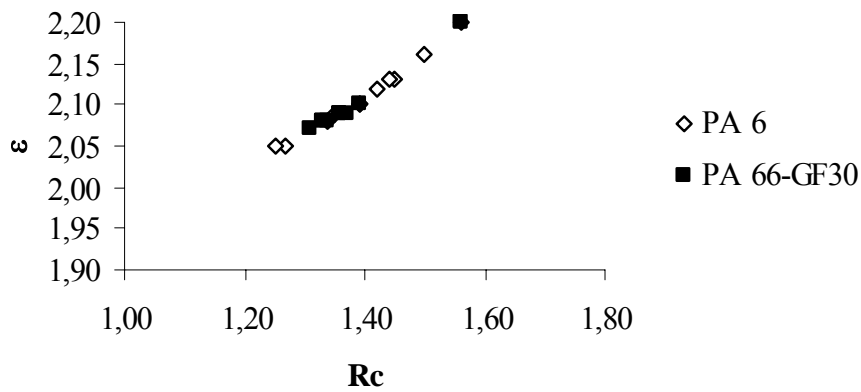


b)

Figura 4.6 - Evolução de la tensión normal (a) y de la tensión tangencial (b) en función de los parámetros de corte (herramienta K10)



a)



b)

Figura 4.7 - Evolución de la deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) en función de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ): a) PCD, b) K10

Como norma general, se obtienen valores de deformación ligeramente más altos cuando se trabaja con la herramienta PCD.

La Tabla A.7 (véase Anexo A) presenta los valores del ángulo de fricción ( $\rho$ ) y del coeficiente de fricción ( $\mu$ ), de acuerdo con la (Ec.4.9). El material compuesto PA 66-GF30 presenta valores mayores de estos parámetros en comparación con el polímero PA 6, debido a la presencia de las fibras de refuerzo. Por otro lado, se obtienen valores menores de estos parámetros si se mecaniza con la herramienta de diamante policristalino (PCD).

La Tabla A.8 (véase Anexo A) muestra los valores de ángulo de corte de Merchant ( $\Phi_M$ ) (Ec. 4.8), la constante de Merchant ( $\delta$ ) y el ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ) (Ec. 4.10).

Los valores de  $\delta$  se han determinado a partir de los valores experimentales del ángulo de corte ( $\Phi$ ). Se ha utilizado el valor medio de  $\delta$  para el cálculo del ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ).

Del análisis los resultados de las Tablas A.5 y A.8, se verifica que son muy similares los valores del ángulo de corte experimental ( $\Phi$ ) y del ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ), lo que indica que el modelo de Merchant corregido viene a ser una muy buena aproximación para estos materiales.

La Tabla 4.2 presenta las expresiones que permiten determinar el ángulo de Merchant corregido a partir de los valores de  $\delta$  medios calculados para cada uno de los materiales y herramientas (Ec. 4.10).

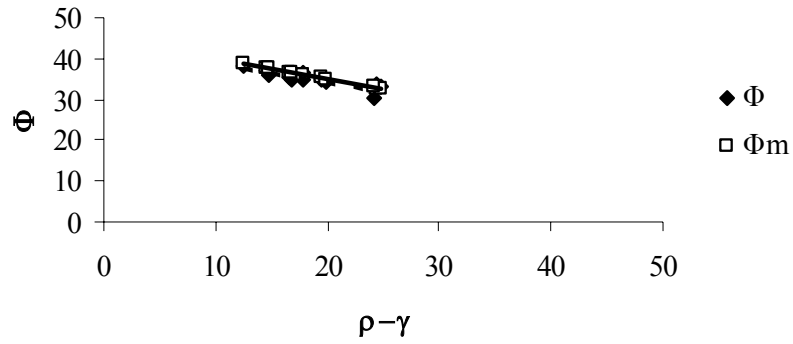
Tabla 4.2 – Modelos de Merchant corregido en Poliamidas

Material	Herramienta	
	PCD	K10
PA 6	$\phi_{Mc} = 44.27 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.11)	$\phi_{Mc} = 45.02 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.12)
PA 66 GF30	$\phi_{Mc} = 50.03 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.13)	$\phi_{Mc} = 43.46 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.14)

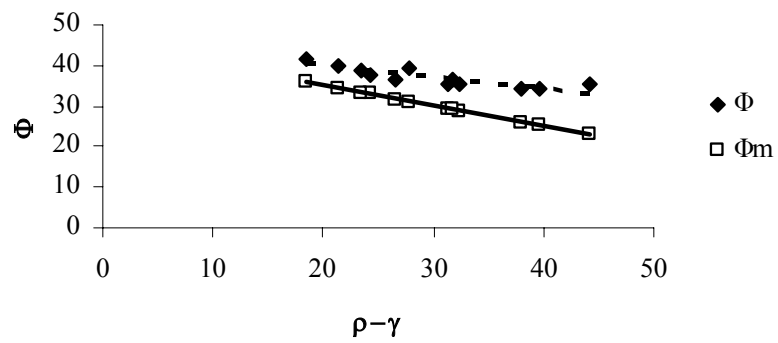
Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran una comparativa del ángulo de corte experimental ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_M$ ). Se marcan las tendencias con una línea con el fin de facilitar la comparación.

Se evidencia que los resultados experimentales en el caso del material PA 6 corresponden prácticamente con la teoría de Merchant. Sin embargo, el efecto del refuerzo origina una desviación sensible con relación a los valores teóricos. Por lo tanto, el modelo teórico de Merchant se puede utilizar con garantías para describir el modelo de corte del material no reforzado (PA 6). En el caso del material reforzado, es preciso efectuar la oportuna corrección (modelo de Merchant corregido) para utilizarlo con un buen grado de aproximación.



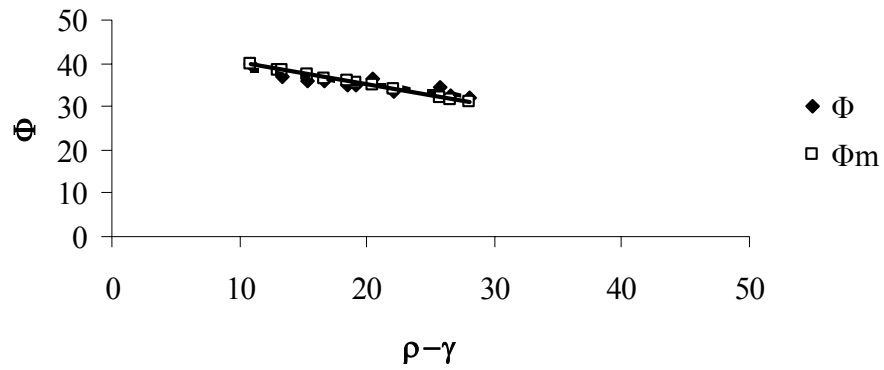


a)

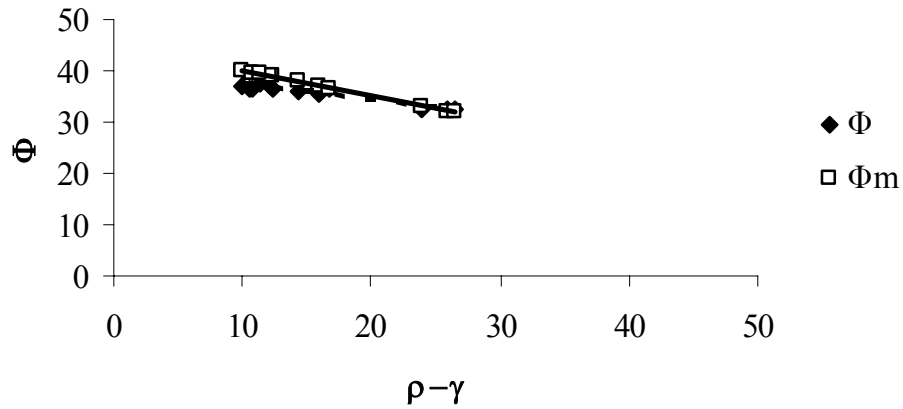


b)

Figura 4.8 - Comparativa del ángulo de corte ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_M$ ) (herramienta PCD): a) PA 6, b) PA 66-GF30



a)



b)

Figura 4.9 -Comparativa del ángulo de corte ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_M$ ) (herramienta K10): a) PA 6, b) PA 66-GF30

#### 4.3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

Siguiendo el mismo esquema de razonamiento anterior, se van a calcular las diferentes magnitudes y realizar las representaciones gráficas correspondientes, a partir del análisis de los resultados reflejados en las Tablas A.9 a A.12 (véase Anexo A).

La Tabla A.9 presenta los valores de la relación inversa de espesores de viruta y del ángulo de corte, obtenidos a partir de las Ecs. (4.1) a (4.4).

A partir del análisis de la Tabla A.9 se puede evidenciar el efecto de las fibras, especialmente en el caso del material reforzado con fibras de vidrio, que origina un

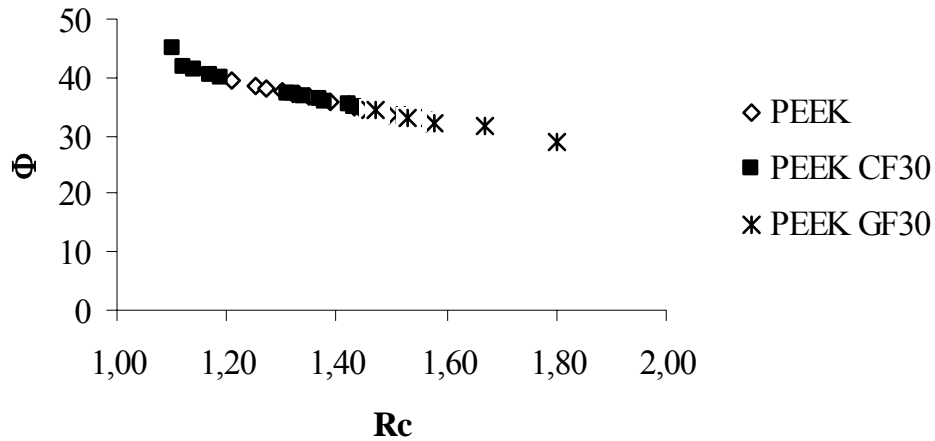
aumento de  $R_c$  y una reducción del ángulo de corte ( $\Phi$ ). Ya se indicó con anterioridad que valores bajos de ángulo de corte implican fuerzas de corte más elevadas y, por tanto, mayores cantidades de energías necesarias para desarrollar todo el proceso de mecanizado. Sencillamente, se trata, aunque se demostrará pormenorizadamente en los Capítulos 5 y 6, de una evidencia de la peor maquinabilidad del PEEK GF30, reforzado con 30% fibras de vidrio, cuando se compara con el PEEK, sin reforzar, y con el PEEK CF30, reforzado con 30% de fibras de carbono. Además, aunque el PEEK CF30, debido al efecto de las fibras de carbono, presenta valores algo menores de ángulo de corte cuando se compara con el PEEK, tienen un comportamiento bastante parecido. Por tanto, el material más difícil de mecanizar es sin duda el PEEK GF30.

La Figura 4.10 presenta la evolución del ángulo de corte ( $\Phi$ ) en función de la relación inversa de espesores de viruta ( $R_c$ ) para los dos materiales estudiados. Se verifica que  $\Phi$  disminuye con  $R_c$ , de acuerdo con una evolución aproximadamente lineal.

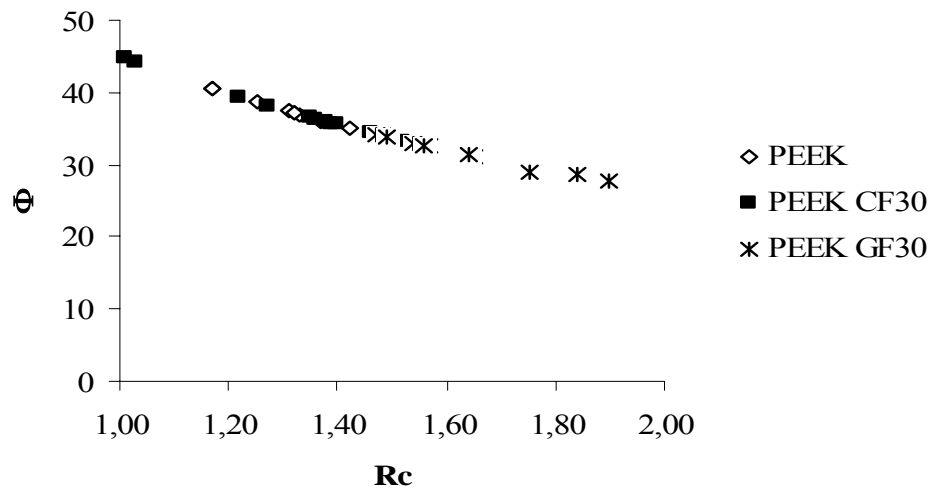
Por otra parte, también pone de manifiesto un comportamiento similar para los dos tipos de herramienta, si bien, para el caso de la herramienta PCD, en los tres materiales se consiguen ángulos de corte ligeramente mayores y, en consecuencia, presenta un comportamiento mejor.

Las Tablas A.3 y A.4 (véase Anexo A) presentan los valores de las tres componentes de la fuerza de corte registrados durante el proceso de mecanizado, en cada uno de los ensayos realizados. Como se puede comprobar, en general la fuerza de corte ( $F_c$ ) es mucho mayor que la fuerza de avance ( $F_a$ ) y que la fuerza de penetración ( $F_p$ ). Por otro lado, la presencia de fibras de refuerzo se traduce en un incremento en el valor de las fuerzas de corte necesarias para materializar el mecanizado, más acusado en el caso del refuerzo de vidrio (PEEK GF30). Adicionalmente, se obtienen valores más bajos cuando se mecaniza con la herramienta PCD, para cualquiera de los materiales.

La Tabla A.10 (véase Anexo A) presenta los valores calculados de las tensiones normales ( $\sigma$ ) (Ec.4.5) y tangenciales ( $\tau$ ) (Ec.4.6), así como de la deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) (Ec.4.7) asociadas al proceso de corte.



a)



b)

Figura 4.10 - Evolución del ángulo de corte ( $\Phi$ ) en función de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ): a) PCD, b) K10

Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran la evolución de las tensiones normales y tangenciales ( $N/mm^2$ ) en función de la velocidad de avance (mm/rev), para las diferentes velocidades de corte y los dos tipos de herramientas. Se representan también los valores medios para cada material, con el fin de facilitar la comparación de los resultados. La tensión normal disminuye con el avance y los materiales compuestos PEEK CF30 y PEEK GF30

presentan valores mayores de  $\sigma$  en comparación con el polímero PEEK, debido al efecto de las fibras de refuerzo. Es significativo que los valores mayores corresponden al refuerzo de vidrio, que pone de manifiesto su mayor dificultad para ser mecanizado. Sin embargo, la tensión tangencial no está influenciada significativamente por la velocidad de avance, en particular para el caso de la herramienta de diamante policristalino, y los materiales reforzados exhiben valores más pequeños de  $\tau$  que el material PEEK.

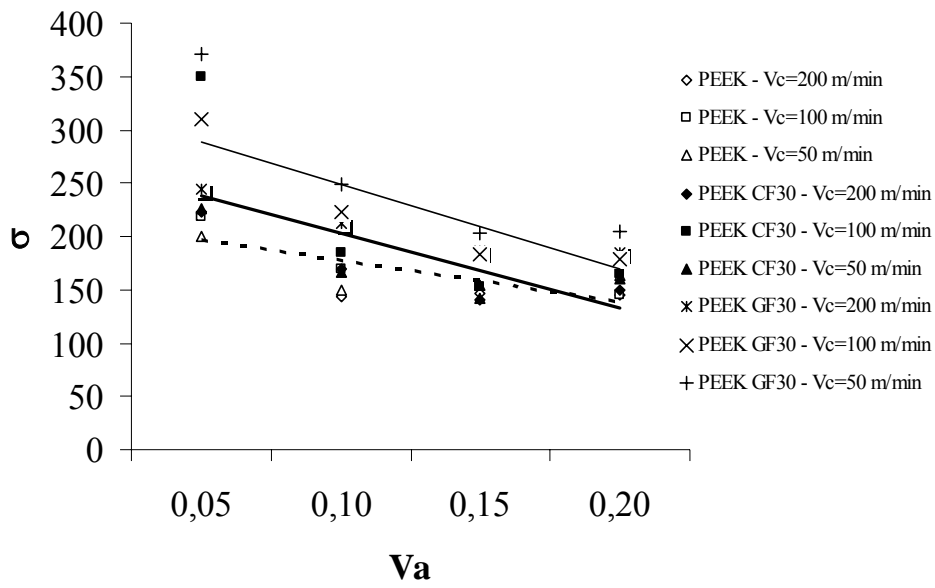
Como se puede observar analizando los resultados de la Tabla A.10 y de las Figuras 4.11. y 4.12 al mecanizar con la herramienta PCD se obtienen valores ligeramente más bajos de tensiones, en particular para algunas condiciones de corte, en comparación con la herramienta K10, lo cual viene a confirmar el mejor comportamiento de la herramienta de diamante policristalino.

La Figura 4.13 muestra la evolución de la deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) en función de la relación inversa de espesores de viruta ( $R_c$ ) para los tres materiales estudiados. Se puede observar que  $\epsilon$  aumenta con  $R_c$ . Además, los materiales compuestos PEEK CF30 y PEEK GF30 presentan valores menores de  $\epsilon$ , debido a la fragilidad de las fibras de refuerzo.

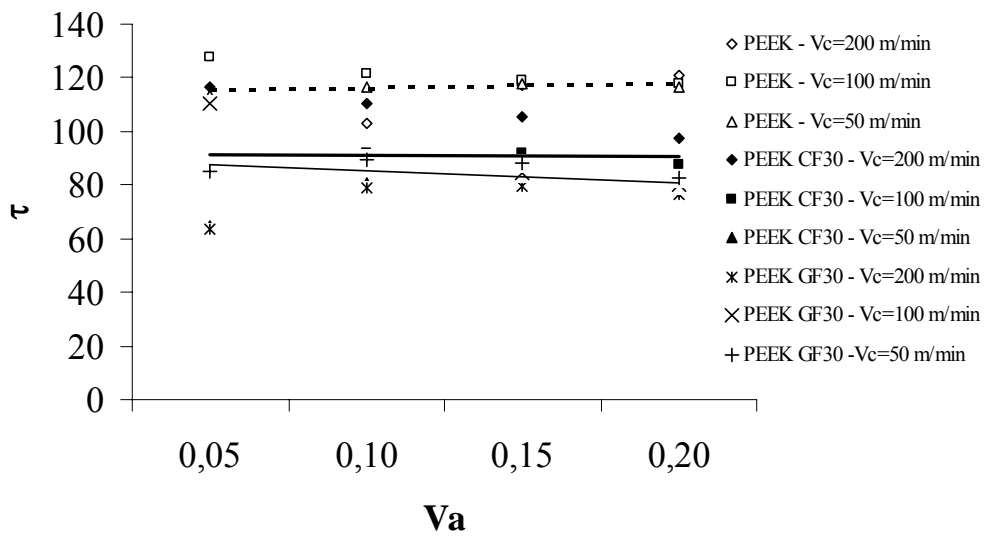
Como norma general, se obtienen valores de deformación ligeramente más altos cuando se trabaja con la herramienta PCD.

La Tabla A.11 (véase Anexo A) presenta los valores del ángulo de fricción ( $\rho$ ) y del coeficiente de fricción ( $\mu$ ), de acuerdo con la (Ec. 4.9). Los materiales compuestos PEEK CF30 y PEEK GF30 presentan valores mayores de estos parámetros en comparación con el polímero PEEK.

Por otro lado, se obtienen valores menores de estos parámetros si se mecaniza con la herramienta de diamante policristalino (PCD).

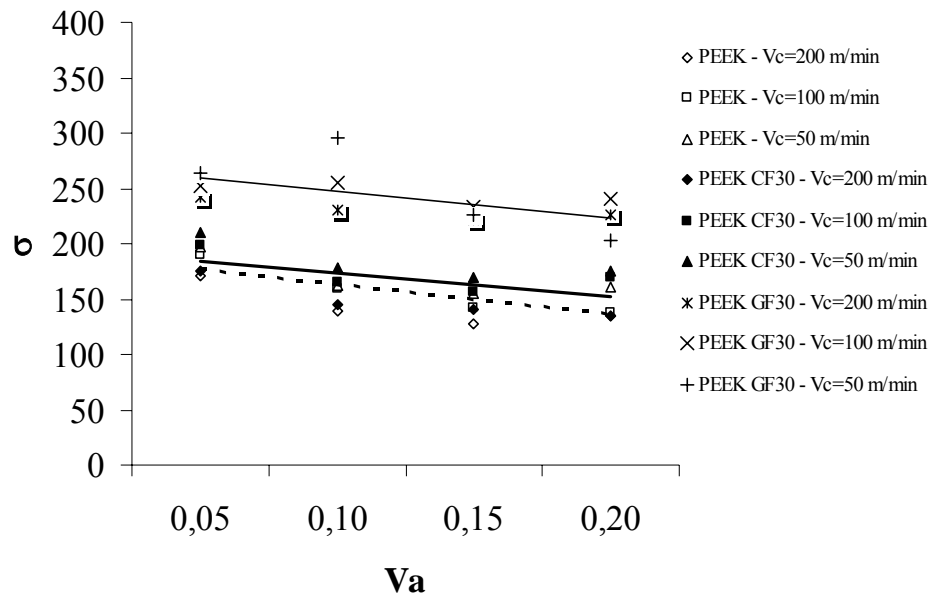


a)

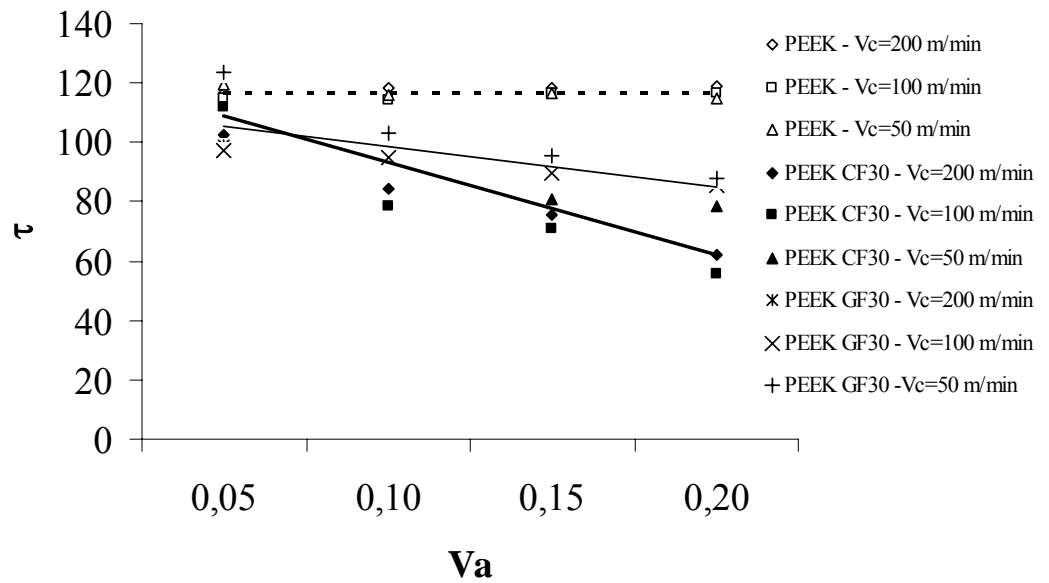


b)

Figura 4.11 - Evolução de la tensión normal (a) y de la tensión tangencial (b) en función de los parámetros de corte (herramienta PCD)

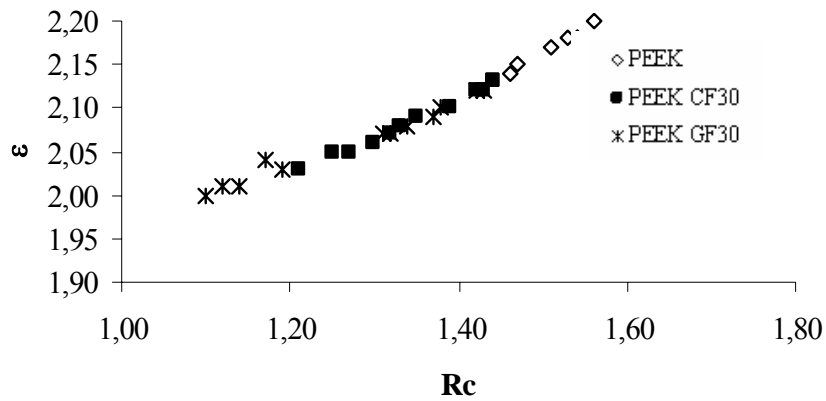


a)

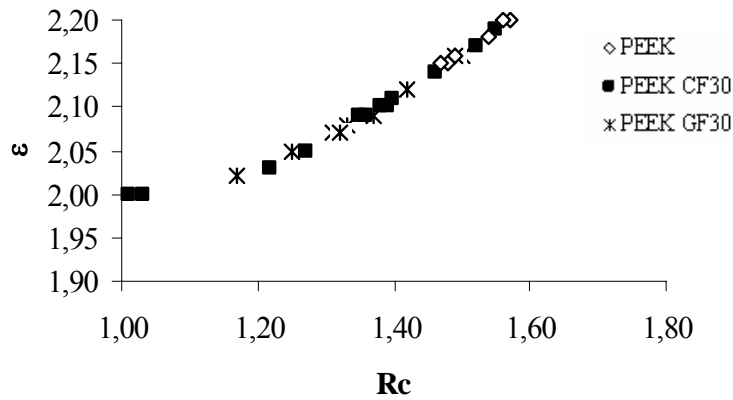


b)

Figura 4.12 - Evolução da tensão normal (a) e da tensão tangencial (b) em função de los parámetros de corte (herramienta K10)



a)



b)

Figura 4.13 - Evolución de la deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) en función de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ): a) PCD, b) K10

La Tabla A.12 (véase Anexo A) muestra los valores de ángulo de corte de Merchant ( $\Phi_M$ ) (Ec. 4.8), la constante de Merchant ( $\delta$ ) y el ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ) (Ec. 4.10). Los valores de  $\delta$  se han determinado a partir de los valores experimentales del ángulo de corte ( $\Phi$ ). Se ha utilizado el valor medio de  $\delta$  para el cálculo del ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ).

De los resultados de las Tablas A.11 a A.12, se verifica que son muy similares los valores del ángulo de corte experimental ( $\Phi$ ) y del ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ), lo cual indica que el modelo de Merchant corregido se ajusta prácticamente a los resultados experimentales y puede servir como modelo de predicción del comportamiento de estos



materiales ante un proceso de mecanizado.

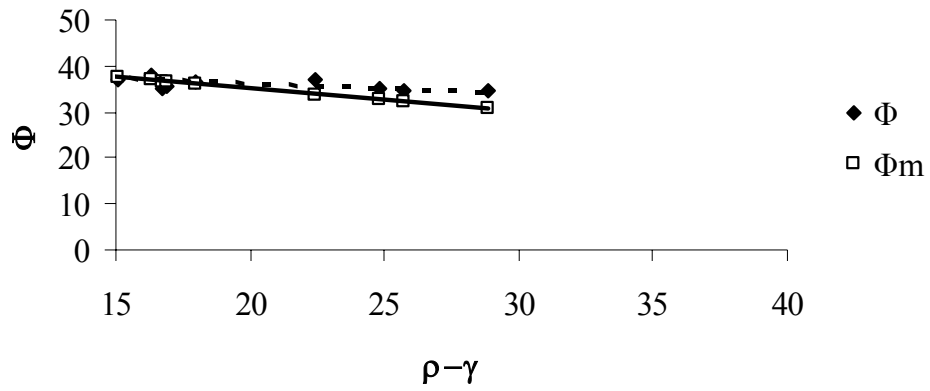
La Tabla 4.3 presenta las expresiones que permiten determinar el ángulo de Merchant corregido a partir de los valores de  $\delta$  medios calculados para cada uno de los materiales y herramientas (Ec. 4.10).

Tabla 4.3 – Modelos de Merchant corregido en Poli (éter-éter-cetonas)

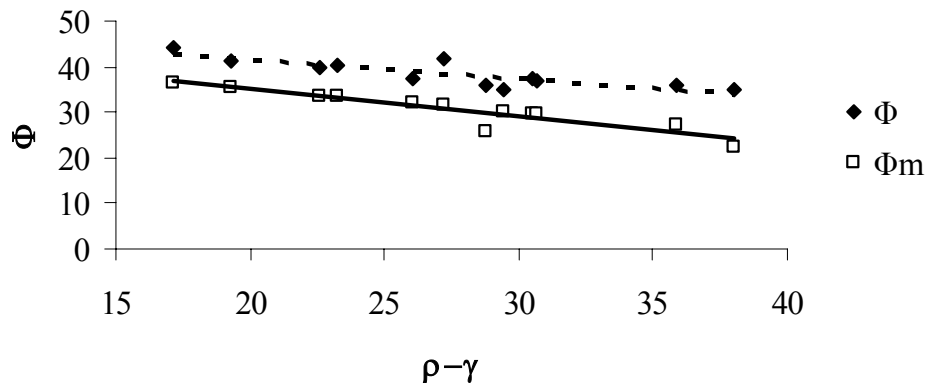
Material	Herramienta	
	PCD	K10
PEEK	$\phi_{Mc} = 45.89 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.15)	$\phi_{Mc} = 44.81 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.16)
PEEK CF30	$\phi_{Mc} = 53.89 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.17)	$\phi_{Mc} = 52.9 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.18)
PEEK GF30	$\phi_{Mc} = 47.61 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.19)	$\phi_{Mc} = 42.62 - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$ (Ec. 4.20)

Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran una comparativa del ángulo de corte experimental ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_M$ ). Se marcan las tendencias con una línea con el fin de facilitar la comparación. De forma semejante a como ocurría con las poliamidas, se evidencia que los resultados experimentales en el caso del material PEEK corresponden prácticamente con la teoría de Merchant. Sin embargo, el efecto de los refuerzos origina una desviación sensible con relación a los valores teóricos. Por lo tanto, el modelo de Merchant se puede utilizar para describir el modelo de corte del material no reforzado (PEEK) y con menor aproximación en el caso de los materiales reforzados (PEEK CF30 y PEEK GF30).

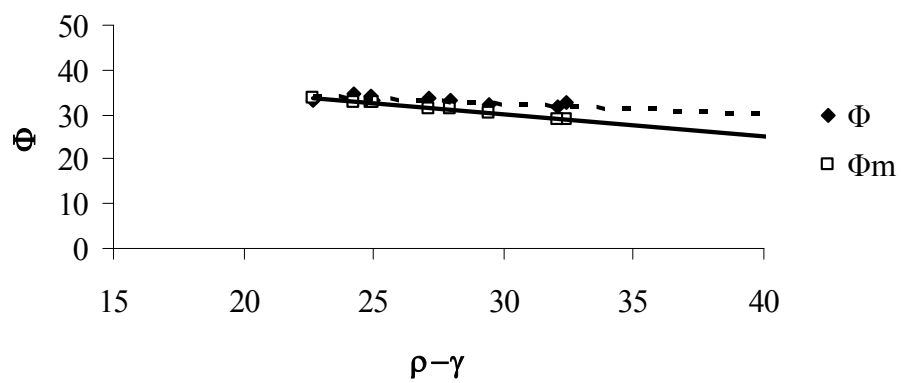
El efecto de las herramientas no es muy significativo en general, si bien puede comprobarse (véase Tabla A.12) cómo en el caso de la herramienta PCD se producen, por un lado, menos diferencias entre los tres materiales y, por otro, diferencias algo menores entre los valores experimentales con relación al modelo de Merchant. Esta evidencia es coherente con todos los comentarios realizados hasta el momento acerca del mejor comportamiento de la herramienta de diamante policristalino para mecanizar estos materiales, en comparación con la de carburo cementado.



a)

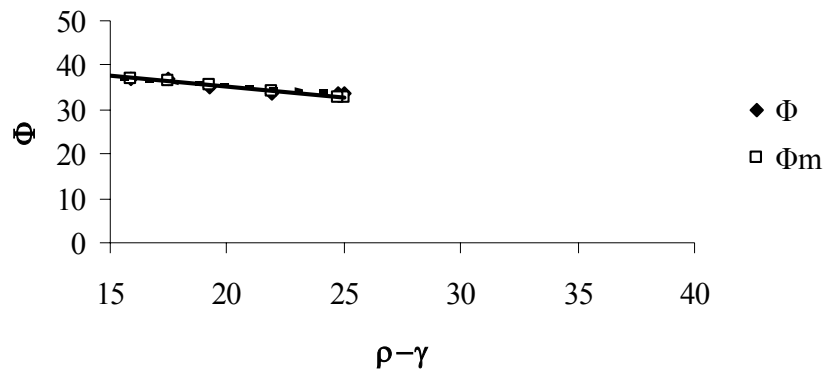


b)

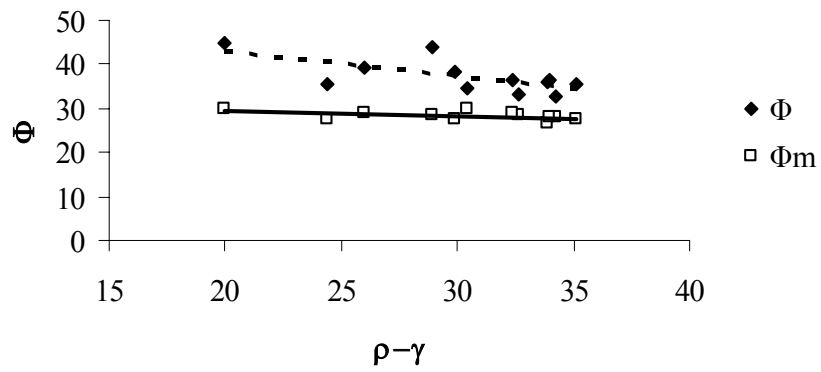


c)

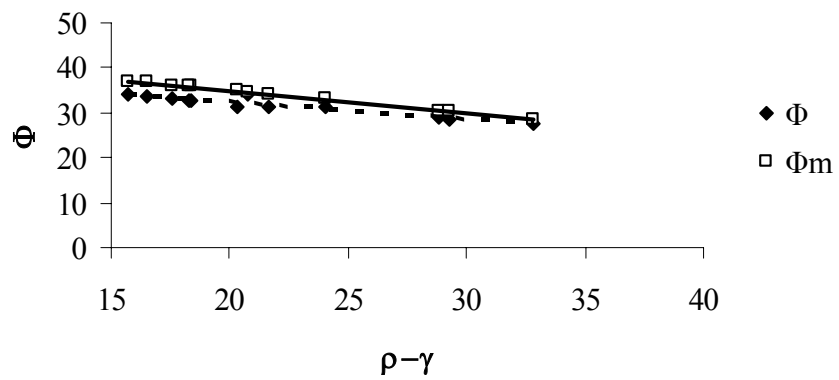
Figura 4.14 - Comparativa del ángulo de corte ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_M$ ) (herramienta PCD): a) PEEK, b) PEEK CF30, c) PEEK GF30



a)



b)



c)

Figura 4.15 - Comparativa del ángulo de corte ( $\Phi$ ) con el modelo de Merchant ( $\Phi_M$ ) (herramienta K10): a) PEEK, b) PEEK CF30, c) PEEK GF30

#### 4.4 Discusión de resultados

Para las dos familias de materiales termoplásticos en estudio (poliamidas y poli (éter-éter-cetonas), se ha podido verificar cómo el efecto de las fibras de refuerzo reduce el ángulo de corte, aumenta las tensiones, reduce las deformaciones de la viruta, aumenta los coeficientes de fricción y aleja sensiblemente los resultados del modelo teórico de Merchant. En este sentido, se demuestra cómo este modelo, inicialmente planteado para metales, sólo se ajusta, aunque con una excelente aproximación, a los materiales no reforzados PA 6 y PEEK, coincidiendo prácticamente modelo experimental con modelo teórico. Sin embargo, para los materiales reforzados PA 66-GF30, PEEK CF30 y PEEK GF30 es preciso introducir correcciones en el modelo. En este sentido, el modelo de Merchant corregido se ajusta prácticamente a los resultados experimentales y puede servir como modelo de predicción del comportamiento de estos materiales ante un proceso de mecanizado. Los materiales compuestos de matriz termoplástica contienen fibras cortas y pueden considerarse como homogéneos, lo que se traduce en obtención de viruta continua con evidencias de deformación plástica; por ello se puede aplicar, con las debidas correcciones, el modelo teórico de Merchant.

Los resultados puestos de manifiesto en cuanto a los valores de ángulos de corte, deformaciones, tensiones y coeficientes de fricción vienen a confirmar cómo la presencia de fibras de refuerzo empeora la aptitud para el mecanizado de estos materiales. En el caso de las poli (éter-éter-cetonas), los peores resultados se obtienen con las fibras de vidrio (PEEK GF30).

En lo que se refiere a la herramienta de corte, por lo general se obtienen resultados sensiblemente mejores con la herramienta de diamante policristalino (PCD).

# Capítulo 5

## 5. Modelos estadísticos para el análisis de la maquinabilidad

### 5.1. Generalidades

### 5.2. Metodología

#### 5.2.1. Análisis de los datos

### 5.3. Análisis de varianza (ANOVA)

#### 5.3.1. Poliamidas

#### 5.3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

### 5.4. Modelos de predicción

#### 5.4.1. Poliamidas

#### 5.4.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

### 5.5 Validación del modelo estadístico

#### 5.5.1. Poliamidas

#### 5.5.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

### 5.6. Discusión de los resultados

# Capítulo 5

## **5. Modelos estadísticos para el análisis de la maquinabilidad**

En el Capítulo 5 se analizarán de manera pormenorizada las técnicas estadísticas utilizadas en el análisis de los datos.

### **5.1. Generalidades**

En este Capítulo se recurre a métodos estadísticos para analizar la maquinabilidad de los materiales compuestos de matriz termoplástica. El análisis de la maquinabilidad se completará en el Capítulo 6, con un enfoque más específico.

En primer lugar, se presenta la metodología a seguir en el tratamiento estadístico de los datos, basado en técnicas Taguchi y análisis de varianza (ANOVA).

Se aplicará el análisis ANOVA a los datos de fuerzas de corte (fuerza de mecanizado, potencia de corte y fuerza específica de corte) y de acabado superficial ( $R_a$  y  $R_t$ ). Se presentan tablas con los resultados y gráficos donde se evidencia la influencia de cada uno de los factores analizados, que ayudará a la discusión posterior. En esencia, se cuantificará la influencia de cada uno de los parámetros funcionales de corte (en particular, la velocidad de corte y la velocidad de avance) sobre la evolución de las fuerzas de corte y del acabado superficial. Este análisis permitirá, además, establecer comparaciones entre los distintos materiales y herramientas utilizadas.

Se proponen modelos de predicción, basados en técnicas de regresión múltiple, que permitan anticipar el comportamiento de estos materiales ante unas condiciones de corte dadas.

Finalmente, se presentan los resultados de los tests de confirmación, para validar los modelos propuestos.

## 5.2. Metodología

Parte del plan experimental desarrollado en este trabajo de investigación se ha llevado a cabo con base al Método de Taguchi (Ross, 1996). Este método debe su nombre a G. Taguchi, relacionado con la calidad de los productos y procesos industriales. Además de haber contribuido enormemente al progreso de Japón en el dominio de la calidad, la filosofía inherente a las técnicas de Taguchi se ha difundido e implementado a nivel mundial desde 1983 (Alexis, 1995; Ross, 1996; De Almeida, 2001).

La metodología seguida en el plan experimental se basa en las matrices ortogonales. De este modo, se pueden verificar todas las combinaciones posibles de los niveles de varios factores de forma organizada. El número de ensayos a realizar se optimiza a una potencia cuya base es el número de niveles de los factores en estudio y el exponente es el número de factores.

En comparación con otras metodologías, las técnicas de Taguchi permiten obtener información sobre el comportamiento del sistema de forma más precisa y eficiente (Ross, 1996).

El plan experimental de Taguchi se compone de varias etapas, entre las que destacan las siguientes (De Almeida, 2001):

- i. Selección de los factores y/o interacciones a estudiar;

- ii. Selección del número de niveles para los factores;
- iii. Selección de la matriz ortogonal de Taguchi adecuada;
- iv. Atribución de factores y/o interacciones a las columnas de la matriz ortogonal;
- v. Ejecución de los ensayos;
- vi. Análisis de los datos;
- vii. Ensayos de confirmación.

La notación utilizada en la definición de una matriz Taguchi es la siguiente:

$$L_a(b^c)$$

Siendo:

- a - número de ensayos a realizar;
- b - número de niveles de cada factor;
- c - número de columnas.

Las matrices ortogonales tienen asociadas tablas y gráficas lineales que permiten definir el número de columnas a utilizar para estudiar las interacciones y adaptar los planteamientos “standard” a las necesidades específicas.

La Tabla 5.1 presenta la matriz seleccionada para este trabajo,  $L_9(3^4)$ , que tiene nueve filas, correspondientes al número de ensayos (8 grados de libertad) con dos columnas y tres niveles. Los factores y las interacciones se han asignado a las columnas. La primera columna se ha asignado a la velocidad de corte, la segunda a la velocidad de avance y el resto a las interacciones consideradas. Esta matriz se ha utilizado con el objetivo de estudiar la influencia de los factores velocidad de avance y velocidad de corte sobre la maquinabilidad de las dos familias de materiales termoplásticos que son objeto de este trabajo de investigación, las poliamidas y las poli (éter-éter-cetonas).



Tabla 5.1 - Matriz ortogonal  $L_9 (2^4)$

$L_9 (2^4)$ Ensayo	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

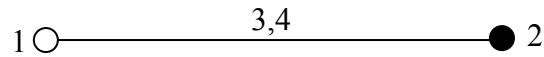


Gráfico lineal  $L_9 (2^4)$  (Ross, 1996).

La Tabla 5.2 indica los factores estudiados y la asignación de los niveles correspondientes.

Tabla 5.2 - Asignación de niveles a los factores

Nivel	$V_c$ (m/min)	$V_a$ (mm/rev)
1	100	0,05
2	200	0,1
3	400	0,2

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

**5.2.1 Análisis de los datos**

El tratamiento de los resultados obtenidos en el desarrollo experimental se ha realizado recurriendo al análisis de varianza (ANOVA- Analysis of Variance), que permite determinar la contribución individual de cada factor y de las interacciones en la dispersión total (Scheaffer y McClave, 1993; Sierra, 1994; Peña, 1994; Moore, 1998; Davim y Cardoso, 2006).

Este método fue desarrollado por Sir Ronald Fisher en la primera mitad del siglo XX como un medio de interpretación de los resultados de experiencias agrícolas. El formato general de la tabla ANOVA, utilizado para resumir los resultados del análisis de varianza, se presenta en la Tabla 5.3.

La tabla ANOVA contiene información necesaria para evaluar el significado de los factores en relación con el error aleatorio (error asociado a las mediciones, factores no controlables, etc.), denominado comúnmente como ruido.

Tabla 5.3 - Tabla ANOVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SQ)	Grados de libertad (gl)	Varianzas (DQM)	Razón F (test F)	Nivel de influencia $\alpha=0.05$	% Contribución (P)
A	$SQ_A = \frac{N}{n_a} \sum a^2$	$n_a - 1$	$DQM_A = \frac{SQ_A}{gl_A}$	$\frac{DQM_A}{DQM_{error}}$	$F_{A_{0.05}}$	$P_A$
B	$SQ_B = \frac{N}{n_b} \sum b^2$	$n_b - 1$	$DQM_B = \frac{SQ_B}{gl_B}$	$\frac{DQM_B}{DQM_{error}}$	$F_{B_{0.05}}$	$P_B$
C	$SQ_C = \frac{N}{n_c} \sum c^2$	$n_c - 1$	$DQM_C = \frac{SQ_C}{gl_C}$	$\frac{DQM_C}{DQM_{error}}$	$F_{C_{0.05}}$	$P_C$
AB	$SQ_{AB} = \frac{N}{n_a n_b} \sum (ab)^2$	$(n_a - 1)(n_b - 1)$	$DQM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{gl_A gl_B}$	$\frac{DQM_{AB}}{DQM_{error}}$	$F_{AB_{0.05}}$	$P_{AB}$
Error	$SQ_e = \sum d^2$	$n_{error}$	$DQM_{error} = \frac{SQ_{error}}{gl_{error}}$	-	-	-

Las etapas fundamentales en la construcción de la tabla ANOVA son las siguientes:

- i) Suma de cuadrados;
- ii) Grados de libertad;
- iii) Varianza;
- iv) Test F;
- v) Nivel de influencia;

vi) Porcentaje de contribución.

i) *Suma de cuadrados*

Notación utilizada para demostrar el método de cálculo:

A y B = factores en estudio

$A_i$  = sumatorio de las observaciones en el nivel  $A_i$

$n_{A_i}$  = número de observaciones en el nivel  $A_i$

$\bar{A}_i$  = media de las observaciones en el nivel  $A_i$

T = suma de todas las observaciones

N = número total de observaciones

$\bar{T}$  = media de todas las observaciones (T/N)

$K_A$  = número de niveles del factor A

y = observación

$y_i$  = i-ésima observación

- *Suma de cuadrados de las variaciones parciales*

$$SQ_A = \sum_{i=1}^{K_A} n_{A_i} (\bar{A}_i - \bar{T})^2 = \left[ \sum_{i=1}^{K_A} \left( \frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.1)$$

- *Suma de cuadrados de la variación total*

$$SQ_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{T})^2 \quad (5.2)$$

- *Suma de cuadrados de la variación dependiente del error*

Una vez calculada la suma de los cuadrados de la variación total y de las variaciones parciales, se determina por sustracción la suma de los cuadrados asociada al error:

$$SQ_e = SQ_T - SQ_A - SQ_B - SQ_C - SQ_{AB} - SQ_{AC} - SQ_{BC} \quad (5.3)$$

ii) *Grados de libertad*

El número total de grados de libertad es una medida de la cantidad de información que se puede obtener a partir de una observación. Representa el número mínimo de comparaciones a efectuar. Cuanto mayor es el número de niveles asociado a un factor, mayor es el número de grados de libertad, es decir, su estudio exige un número mayor de comparaciones, lo que se traduce en una información más fiable de sus efectos.

- *Grados de libertad de un factor*

Matemáticamente, el número de grados de libertad de un factor es igual al número de niveles considerado menos uno. Esto representa el número de ecuaciones independientes que se pueden escribir para los efectos de estos factores.

- *Grados de libertad de la interacción de dos factores*

Matemáticamente, el número de grados de libertad de la interacción de dos factores viene dado por el producto de los grados de libertad de cada factor, esto es:

$$\text{Grados de libertad (AxB)} = \text{grados de libertad (A)} \times \text{grados de libertad de (B)}$$

*iii) Varianza*

La varianza consiste en los desvíos cuadráticos medios y se define como la relación entre la suma de cuadrados (DQM) y los grados de libertad (gl) respectivos:

$$\text{DQM}_A = \frac{\text{SQ}_A}{\text{gl}_A} \quad (5.4)$$

*iv) Test F*

El test F consiste sencillamente en una razón entre varianzas. Estadísticamente, es una herramienta que permite verificar para un determinado nivel de influencia si los factores y/o interacciones son significativamente diferentes de cero:

$$F = \frac{DQM_A}{DQM_{error}}; \quad F = \frac{DQM_{AB}}{DQM_{error}} \quad (5.5)$$

Después de calcular el valor de F, se verifica su significado estadístico en una tabla.

Si:

$$F_{\text{calculado}} \gg F_{\alpha} \text{ (tabla)}$$

entonces se dice que el factor y/o interacción es estadísticamente significativo.

v) *Nivel de influencia*

El nivel de influencia representa la probabilidad (o riesgo) de aceptar que el factor o interacción puede ser significativo cuando esta hipótesis es nula. En este trabajo se utiliza el nivel 0.05 como referencia a partir de la cual es rechazada la hipótesis nula. En otras palabras, cualquier conclusión presentará un nivel de confianza de 95%.

vi) *Porcentaje de contribución*

El porcentaje de contribución es indicativo del peso relativo de un factor y/o interacción para reducir la variación total observada en la experiencia. Si el nivel del factor y/o interacción fuera controlado con elevada precisión, la variación total podría ser reducida en un valor igual al indicado por el porcentaje de contribución.

● *Cálculo del porcentaje de contribución*

La varianza de un factor o interacción incluye un cierto valor debido al error. La siguiente ecuación muestra este hecho para el factor A:

$$DQM_A = DQM'_A + DQM_{error} \quad (5.6)$$

$DQM'_A$  es el valor esperado de la varianza debido solamente al factor A. Despejando el valor de  $DQM'_A$  se tiene,

$$DQM'_A = DQM_A - DQM_{error} \quad (5.7)$$

$$DQM_A = \frac{SQ_A}{gl_A}, \quad \text{entonces} \quad DQM'_A = \frac{SQ'_A}{gl_A} \quad (5.8)$$

Sustituyendo en la ecuación (5.7),

$$\frac{SQ'_A}{gl_A} = \frac{SQ_A}{gl_A} - DQM_{\text{error}} \quad (5.9)$$

Despejando el valor de  $SQ'_A$  se tiene,

$$SQ'_A = SQ_A - (DQM_{\text{error}}) \cdot gl_A \quad (5.10)$$

$SQ'_A$  es la suma de los cuadrados esperada debido al factor A, y el porcentaje de contribución ( $P_A$ ) para la variación total se puede calcular ahora:

$$P(\%) = \left[ \frac{SQ'_A}{SQ_T} \right] \times 100 \quad (5.11)$$

Este razonamiento se ha aplicado al factor A, y de igual manera puede ser también aplicado a cualquier otro factor o interacción.

### 5.3. Análisis de varianza (ANOVA)

Con objeto de determinar la influencia de la velocidad de corte ( $V_c$ ) y de la velocidad de avance ( $V_a$ ) en la varianza total de los resultados, se ha realizado un análisis ANOVA de los datos para los materiales y herramientas estudiados. Los análisis se han llevado a cabo para un nivel de significado de 5%, es decir, para un nivel de confianza de un 95%.

El tratamiento de los resultados experimentales está basado en el análisis de varianza (Ross, 1996). Para la elaboración del plan de experimentos, se ha utilizado una matriz ortogonal para dos factores y tres niveles, tal y como se comentó antes.

Esta técnica estadística se ha aplicado para las dos familias de materiales estudiados

(poliamidas y poli (éter-éter-cetonas) y los dos tipos de herramientas utilizadas (K10 y PCD), sobre los resultados de las fuerzas de corte ( $F_m$ ,  $P_c$ ,  $K_s$ ) (Tablas B.1 a B.4 del Anexo B) y el acabado superficial ( $R_a$ ,  $R_t$ ) (Tablas B.5 a B.8 del Anexo B).

Los valores de estas variables se pueden calcular recurriendo a las siguientes ecuaciones (Groover, 1996):

$$F_m = \sqrt{F_c^2 + F_a^2 + F_p^2} \quad (5.12)$$

$$P_c = F_c \times V_c \quad (5.13)$$

$$K_s = \frac{F_c}{S} = \frac{F_c}{V_a \times P} \quad (5.14)$$

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.

### 5.3.1. Poliamidas

La Tabla 5.4 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la fuerza de mecanizado ( $F_m$ ). La última columna de la Tabla presenta los valores del porcentaje de contribución (P) de cada factor en la varianza total, indicando por tanto el grado de influencia en los resultados. Analizando la Tabla, se puede observar que tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance son significativas sobre la variable dependiente (Test  $F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P (\%) > \text{error}$ ). Además, la velocidad de avance es el factor que tiene una influencia más elevada en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados.

La Figura 5.1 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se observa claramente cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados (superiores al 90% en la mayoría de los casos) en comparación con la velocidad de corte. Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas. Por otra parte, el error representa un porcentaje muy bajo.

Tabla 5.4 - Tabla ANOVA para la fuerza de mecanizado: poliamidas

Mat.	Fuente de variación	SDQ		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha=5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
PA 6	V <sub>c</sub>	5,47	15,1	2		2,73	7,5	198,67	111,17	6,94		0,1	0,4
	V <sub>a</sub>	4.437	7.048	2		2.218	3.524	161.107	547,4	6,94		99,9	98,8
	Int.	0,20	33,7	4		0,10	16,8	7,6	2,6	0		0,0	0,5
	Error	0,05	25,7	4		0,01	6,4	/	/	/		0,0	0,3
	Total	4.443	7.123	8		/	/	/	/	/		100	100
PA 66 GF30	V <sub>c</sub>	162,1	1.743	2		81,05	871,8	7,36	21,5	6,94		2,1	11,7
	V <sub>a</sub>	6.464	5.614	2		3.232	2.807	293,51	69,4	6,94		96,3	83,1
	Int.	16,2	156,1	4		8,1	78,05	0,73	1,9	0		0,3	0,9
	Error	44,05	161,6	4		11,01	40,4	/	/	/		1,3	4,2
	Total	6.686	7.676	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, Gl –Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance

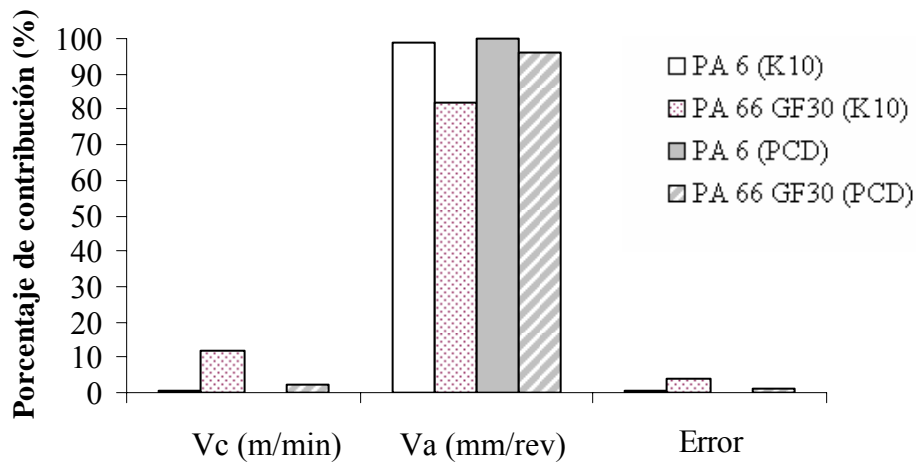


Figura 5.1 – Representación de los porcentajes de contribución: fuerza de mecanizado en poliamidas



La Tabla 5.5 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la potencia de corte ( $P_c$ ). La última columna de la Tabla presenta los valores del porcentaje de contribución (P) de cada factor en la varianza total, indicando por tanto el grado de influencia en los resultados. Analizando la Tabla, se observa que tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance son significativas sobre la variable dependiente (Test F >  $F_{\alpha=5\%}$  y P (%) > error). En este caso, velocidad de corte y velocidad de avance tienen una influencia comparable en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados.

La Figura 5.2 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se observa cómo la velocidad de corte presenta porcentajes de contribución más elevados que la velocidad de avance (aprox. 20% más), circunstancia que es lógica dado que la potencia depende directamente de la velocidad de corte ( $P_c = F_c \cdot V_c$ ). Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas.

Tabla 5.5 - Tabla ANOVA para la potencia de corte: poliamidas

Mat.	Fuente de variación	SDQ		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha = 5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
PA 6	$V_c$	31.657	45.641	2		15.828	22.820	19,15	25,81	6,94		57,5	58,2
	$V_a$	19.477	26.919	2		9.738	13.459	11,78	15,22	6,94		30,9	31,6
	Int.	3.244	3.392	4		1.622	1.696	1,96	1,91	0		0,1	0,2
	Error	3.306	3.537	4		826	884	/	/	/		11,5	9,9
	Total	57.685	79.490	8		/	/	/	/	/		100	100
PA 66 GF30	$V_c$	34.300	60.373	2		17.150	30.186	13,49	17,95	6,94		47,2	56,9
	$V_a$	27.144	30.481	2		13.572	15.240	10,68	9,06	6,94		36,0	28,1
	Int.	3.709	6.347	4		1.854	3.173	1,45	1,8	0		2,0	0,8
	Error	5.083	6.727	4		1.270	1.681	/	/	/		14,5	12,9
	Total	7.023	10.392	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, Gl – Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción  $V_c/V_a$

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

$V_c$ : Velocidad de corte

$V_a$ : Velocidad de avance

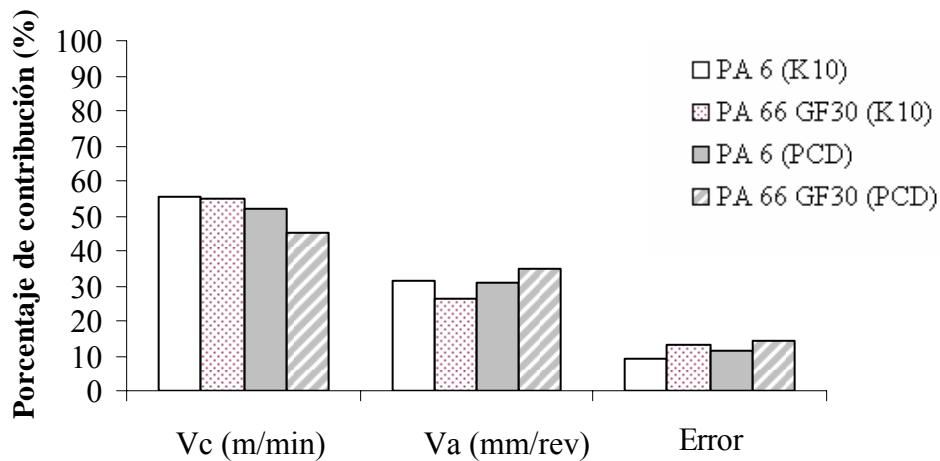


Figura 5.2 – Representación de los porcentajes de contribución:  
potencia de corte en poliamidas

La Tabla 5.6 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la fuerza específica de corte ( $K_s$ ). Como en los casos anteriores, la última columna de la Tabla presenta los valores del porcentaje de contribución (P) de cada factor en la varianza total, indicando por tanto el grado de influencia en los resultados. Analizando la Tabla, se puede observar que tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance son significativas sobre la variable dependiente ( $\text{Test } F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P (\%) > \text{error}$ ). Además, la velocidad de avance es el factor que tiene una influencia más elevada en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados.

La Figura 5.3 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se observa claramente cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados (superiores al 90%) en comparación con la velocidad de corte, lo que indica que este factor afecta significativamente a los resultados. Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas. Por otra parte, el error representa un porcentaje muy bajo.

Tabla 5.6 - Tabla ANOVA para la fuerza específica de corte: poliamidas

Mat.	Fuente de variación	SDQ		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha=5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
PA 6	V <sub>c</sub>	112	3,31	2		56,32	1,65	15,49	12,02	6,94		2,6	4,5
	V <sub>a</sub>	3.937	10.330	2		1.968	5.165	541,47	58,88	6,94		96,3	91,1
	Int.	15,57	462,13	4		7,78	231,06	2,14	2,63	0		0,0	1,0
	Error	14,54	350,91	4		3,63	87,72	/	/	/		0,7	3,3
	Total	4.080	11.146	8		/	/	/	/	/		100	100
PA 66 GF30	V <sub>c</sub>	2.206	174,1	2		1.103	87,09	7,25	12,25	6,94		2,3	1,7
	V <sub>a</sub>	12.889	13.643	2		6.444	6.821	36,50	175,88	6,94		96,5	95,1
	Int.	591	295,7	4		295	147,8	1,67	3,81	0		0,7	1,0
	Error	706	155,14	4		176,5	38,78	/	/	/		0,6	2,2
	Total	16.394	14.268	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, Gl –Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance

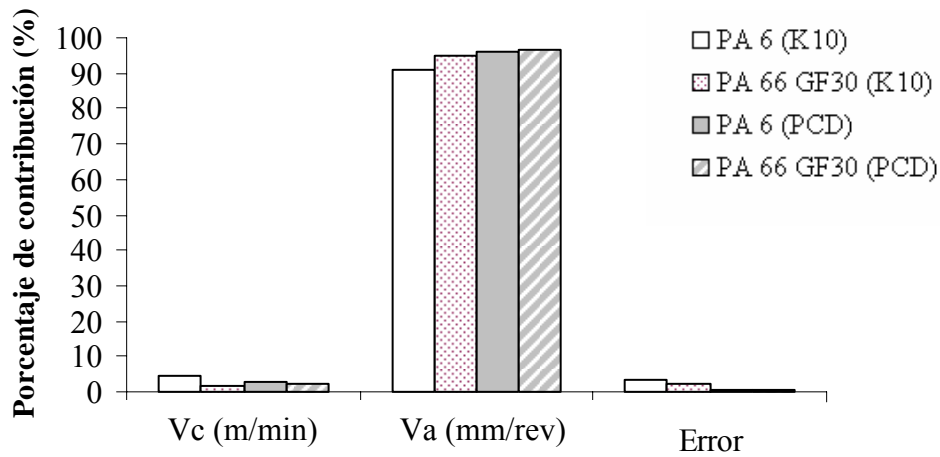


Figura 5.3 – Representación de los porcentajes de contribución: fuerza específica de corte en poliamidas

La Tabla 5.7 presenta los resultados del análisis de varianza para la rugosidad media (Ra). Como se puede observar, tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance tienen significado físico y estadístico sobre la fuerza de mecanizado obtenida ( $\text{Test } F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P (\%) > \text{error}$ ). Además, la velocidad de avance es el factor que tiene una influencia más elevada en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados. La Figura 5.4 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se observa cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados en comparación con la velocidad de corte, lo que indica, junto con el valor del Test F, que este factor afecta significativamente a los resultados. De hecho, hablamos de porcentajes por encima del 99% en todos los casos. No se aprecian apenas diferencias entre materiales y herramientas. Por otra parte, el error representa un porcentaje prácticamente nulo.

Tabla 5.7 - Tabla ANOVA para la rugosidad media: poliamidas

Mat.	Fuente de variación	SDQ		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha=5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
PA 6	V <sub>c</sub>	0,008	0,006	2		0,00401	0,0032	14,43	20,59	6,94	0,1	0,2	
	V <sub>a</sub>	12,48	21,97	2		6,24	10,98	6.891	2.016	6,94	99,8	99,7	
	Int.	0,0004	0,010	4		0,0002	0,0052	0,233	0,960	0	0,0	0,0	
	Error	0,0036	0,021	4		0,0009	0,0054	/	/	/	0,1	0,1	
	Total	12,49	22,01	8		/	/	/	/	/	100	100	
PA 66 GF30	V <sub>c</sub>	0,031	0,006	2		0,015	0,003	13,14	16,89	6,94	0,2	0,2	
	V <sub>a</sub>	13,30	11,13	2		6,65	5,56	1.771	1.540	6,94	99,5	99,6	
	Int.	0,008	0,008	4		0,0044	0,004	1,17	1,22	0	0,1	0,1	
	Error	0,015	0,014	4		0,0037	0,003	/	/	/	0,2	0,1	
	Total	13,3	11,1	8		/	/	/	/	/	100	100	

SDC – Suma de cuadrados, Gl – Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance

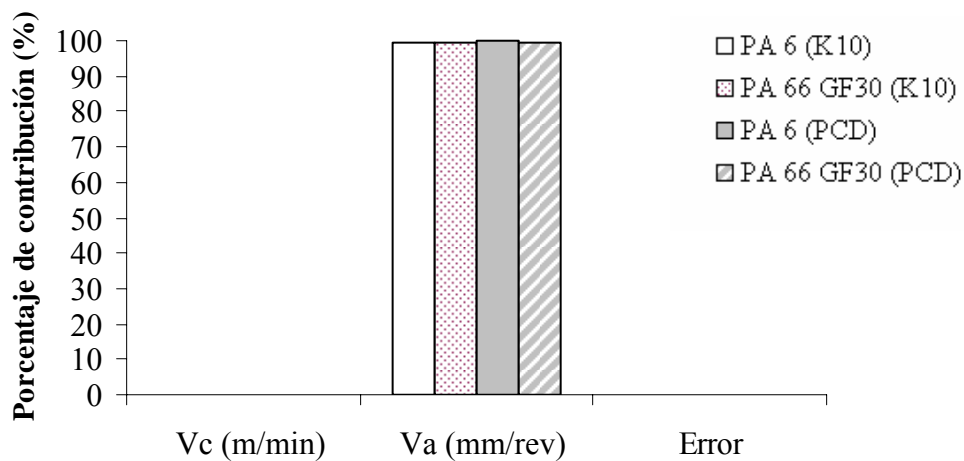


Figura 5.4 – Representación de los porcentajes de contribución:  
Rugosidad media ( $R_a$ ) en poliamidas

La Tabla 5.8 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la rugosidad máxima ( $R_t$ ). Analizando la Tabla, se puede observar que tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance son significativas sobre la variable dependiente ( $\text{Test } F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P(\%) > \text{error}$ ). Además, la velocidad de avance es el factor que tiene una influencia más elevada en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados. La Figura 5.5 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se aprecia cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados en comparación con la velocidad de corte. De hecho, de forma semejante a lo comentado en el caso de la rugosidad media, nos referimos a porcentajes por encima del 98% en todos los casos. Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas. Por otra parte, el error representa un porcentaje prácticamente nulo.

Tabla 5.8 - Tabla ANOVA para la rugosidad máxima: poliamidas

Mat.	Fuente de variación	SDQ		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha=5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
PA 6	V <sub>c</sub>	2,69	1,05	2		1,345	0,52	39,50	33,68	6,94		1,3	0,6
	V <sub>a</sub>	194,03	307,3	2		97,018	153,6	2.847	1.069	6,94		98,3	99,2
	Int.	0,52	0,501	4		0,2617	0,250	7,68	1,74	0		0,2	0,0
	Error	0,136	0,57	4		0,034	0,143	/	/	/		0,1	0,2
	Total	197,3	309,5	8		/	/	/	/	/		100	100
PA 66 GF	V <sub>c</sub>	0,058	0,713	2		0,029	0,356	10,46	12,76	6,94		0,1	0,4
	V <sub>a</sub>	244,1	239,1	2		122,07	119,55	1.911	924,21	6,94		99,7	99,3
	Int.	0,01	0,18	4		0,007	0,094	0,1222	0,731	0		0,1	0,1
	Error	0,255	0,51	4		0,063	0,129	/	/	/		0,1	0,2
	Total	244,4	240,5	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, Gl –Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance

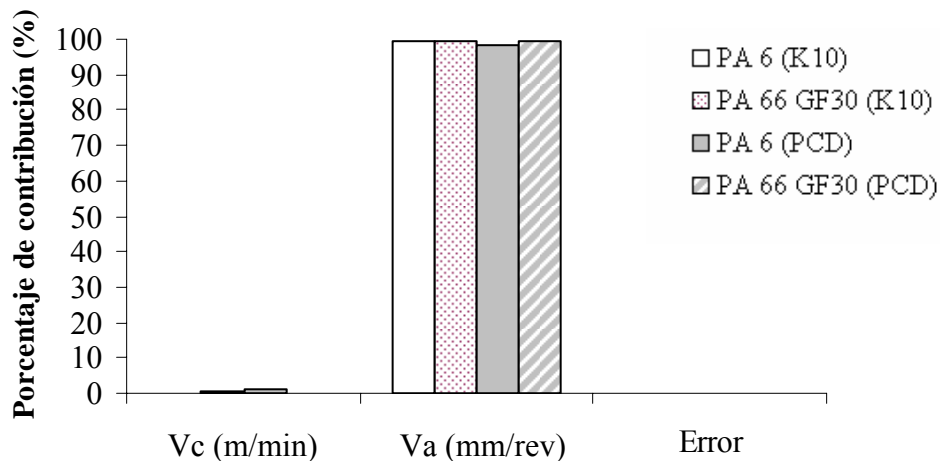


Figura 5.5 – Representación de los porcentajes de contribución:  
Rugosidad máxima (R<sub>t</sub>) en poliamidas

**5.3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)**

La Tabla 5.9 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la fuerza de mecanizado ( $F_m$ ). La última columna de la Tabla presenta los valores del porcentaje de contribución (P) de cada factor en la varianza total, indicando por tanto el grado de influencia en los resultados. Analizando la Tabla, se puede observar que tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance son significativas sobre la variable dependiente (Test  $F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P(\%) > \text{error}$ ). Además, la velocidad de avance es el factor que tiene una influencia más elevada en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados.

Tabla 5.9 - Tabla ANOVA para la fuerza de mecanizado: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Fuente de variación	SDC		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha=5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
<b>PEEK</b>	V <sub>c</sub>	92,6	84,5	2		46,3	42,27	35,35	31,34	6,94		0,8	0,9
	V <sub>a</sub>	9.852	9.089	2		4.926	4.544	568,4	3.369	6,94		98,5	98,9
	Int.	8	7,7	4		4	3,8	0,46	2,86	0		0,2	0,1
	Error	34,6	5,3	4		8,6	1,34	/	/	/		0,6	0,1
	Total	9.988	9.187	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK CF30</b>	V <sub>c</sub>	372	71,6	2		186	35,8	295,1	20,57	6,94		4,9	3,7
	V <sub>a</sub>	7.226	12.924	2		3.613	6.462	5.732	103,1	6,94		95,0	95,8
	Int.	4,3	117,8	4		2,1	58,9	3,4	0,94	0		0,0	0,1
	Error	2,5	250,5	4		0,6	62,6	/	/	/		0,1	0,4
	Total	7.605	13.365	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK GF30</b>	V <sub>c</sub>	383,7	282,7	2		191,87	141,35	9,60	41,59	6,94		7,9	5,7
	V <sub>a</sub>	3.986	4.530	2		1.993	2.265	99,73	666,63	6,94		87,5	93,6
	Int.	115,3	8,2	4		57,6	4,14	2,88	1,22	0		0,8	0,1
	Error	79,9	13,5	4		19,9	3,3	/	/	/		3,8	0,6
	Total	4.565	4.835	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, Gl –Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción  $V_c/V_a$

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance

La Figura 5.6 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se observa claramente cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados en comparación con la velocidad de corte y, de acuerdo con la Tabla 5.9, afecta significativamente a los resultados. Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas. Por otra parte, el error representa un porcentaje muy bajo.

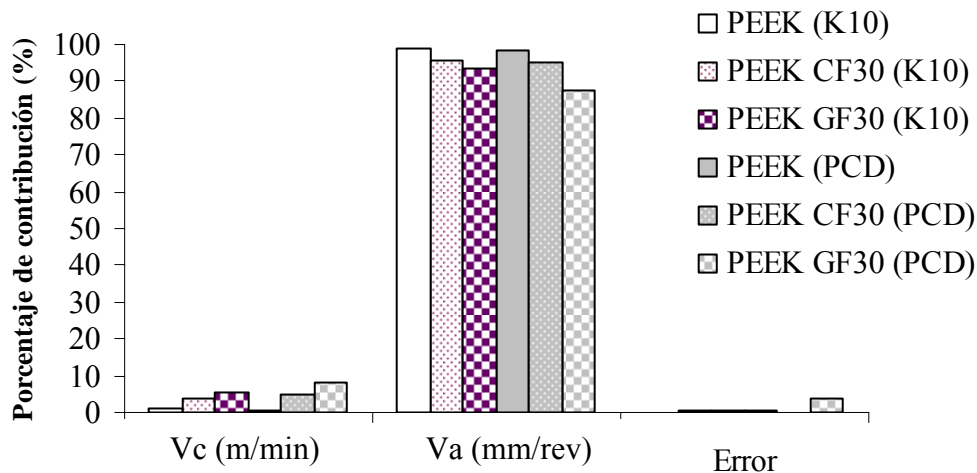


Figura 5.6 – Representación de los porcentajes de contribución: fuerza de mecanizado en poli (éter-éter-cetonas)

La Tabla 5.10 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la potencia de corte ( $P_c$ ). Analizando la Tabla, se puede observar que tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance son significativas sobre la variable dependiente (Test  $F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P(\%) > \text{error}$ ). En este caso, velocidad de corte y velocidad de avance tienen una influencia comparable en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados.

La Figura 5.7 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se observa cómo la velocidad de corte presenta porcentajes de contribución más elevados que la velocidad de avance, circunstancia que es lógica dado que la potencia depende directamente de la velocidad de corte ( $P_c = F_c * V_c$ ). Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y



herramientas.

Tabla 5.10 - Tabla ANOVA para la potencia de corte: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Fuente de variación	SDC		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha= 5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
<b>PEEK</b>	V <sub>c</sub>	58.339	54.747	2		29.169	27.373	15,69	18,90	6,94		47,9	49,7
	V <sub>a</sub>	44.544	37.972	2		22.272	18.986	11,98	13,11	6,94		36,7	35,6
	Int.	7.453	5.905	4		3.726	2.952	2,00	2,03	0		0,9	0,8
	Error	7.438	5.794	4		1.859	1.448	/	/	/		13,9	12,8
	Total	117.775	10.442	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK CF30</b>	V <sub>c</sub>	68.645	68.604	2		34.322	34.302	24,61	21,23	6,94		59,8	57,3
	V <sub>a</sub>	33.237	37.775	2		16.618	18.887	11,91	11,69	6,94		26,9	30,2
	Int.	5.580	5.397	4		2.790	2.698	2,00	1,67	0		1,5	0,9
	Error	5.579	6.461	4		1.394	1.615	/	/	/		11,7	10,9
	Total	113.041	118.238	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK GF30</b>	V <sub>c</sub>	48.606	40.323	2		24.303	20.161	24,09	22,99	6,94		58,7	58,0
	V <sub>a</sub>	24.040	20.517	2		12.020	10.258	11,91	11,70	6,94		28,9	28,7
	Int.	4.035	3.327	4		2.017	1.663	2,00	1,89	0		0,9	1,3
	Error	4.035	3.508	4		1.008	877	/	/	/		11,0	10,9
	Total	80.718	67.676	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, Gl –Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance

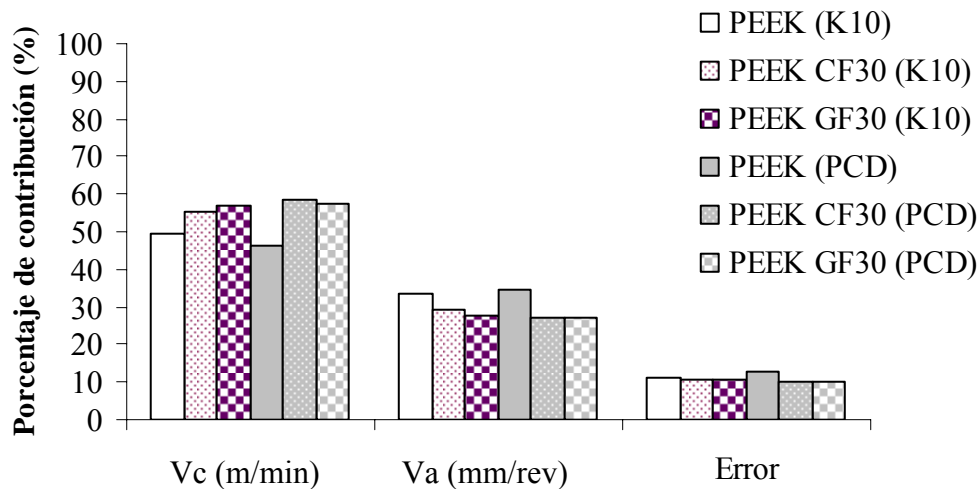


Figura 5.7 – Representación de los porcentajes de contribución: potencia de corte en poli (éter-éter-cetonas)

La Tabla 5.11 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la fuerza específica de corte ( $K_s$ ). La última columna de la Tabla presenta los valores del porcentaje de contribución (P) de cada factor en la varianza total, indicando por tanto el grado de influencia en los resultados. Analizando la Tabla, se puede observar que tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance son significativas sobre la variable dependiente (Test  $F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P (\%) > \text{error}$ ). Además, la velocidad de avance es el factor que tiene una influencia más elevada en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados.

La Figura 5.8 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se observa claramente cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados en comparación con la velocidad de corte. Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas. Por otra parte, el error representa un porcentaje muy bajo.

Tabla 5.11 - Tabla ANOVA para la fuerza específica de corte: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Fuente de variación	SDC		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha=5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
<b>PEEK</b>	V <sub>c</sub>	1.889	974,32	2		944	487,1	25,68	896,5	6,94		11,4	11,2
	V <sub>a</sub>	11.599	7.677	2		5.799	3.838	157,65	7.064	6,94		72,3	88,5
	Int.	2.299	18,01	4		1.149	9,0	31,25	16,57	0		13,5	0,2
	Error	147,15	2,17	4		36,78	0,54	/	/	/		1,8	0,1
	Total	15.935	8.671	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK CF30</b>	V <sub>c</sub>	1.140	343,152	2		570,3	171,5	9,31	10,5	6,94		3,2	8,2
	V <sub>a</sub>	29.972	21.167	2		14.986	10.583	244	33,7	6,94		94,4	87,3
	Int.	271,8	774,24	4		135,9	387,12	2,21	1,23	0		0,1	2,0
	Error	245,1	1.255	4		61,29	313,9	/	/	/		1,6	1,8
	Total	31.630	23.540	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK GF30</b>	V <sub>c</sub>	11.925	40.323	2		5.962	20.161	23,73	22,99	6,94		13,8	17
	V <sub>a</sub>	43.498	20.517	2		21.749	10.258	13,62	11,70	6,94		82	79
	Int.	6.304	3.327	4		3.152	1.663	1,97	1,89	0		0,9	0,3
	Error	6.387	3.508	4		1.596	877	/	/	/		3	4
	Total	68.116	67.676	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, Gl –Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance

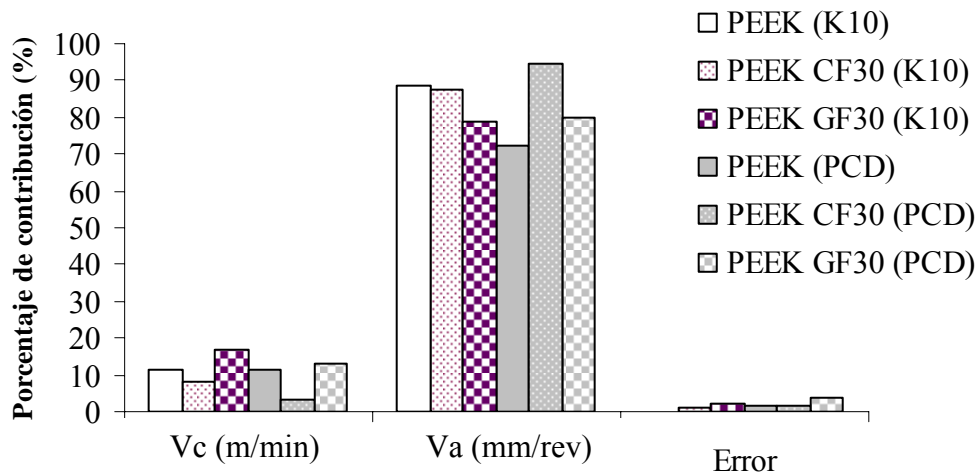


Figura 5.8 – Representación de los porcentajes de contribución: fuerza específica de corte en poli (éter-éter-cetonas)

La Tabla 5.12 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la rugosidad media (Ra). La última columna de la Tabla presenta los valores del porcentaje de contribución (P) de cada factor en la varianza total, indicando por tanto el grado de influencia en los resultados. Analizando la Tabla, se puede observar que tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance son significativas sobre la variable dependiente (Test  $F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P(\%) > \text{error}$ ). Además, la velocidad de avance es el factor que tiene una influencia más elevada en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados.

La Figura 5.9 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se observa claramente cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados en comparación con la velocidad de corte. De hecho, hablamos de porcentajes por encima del 99% en todos los casos. Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas. Por otra parte, el error representa un porcentaje prácticamente nulo.

Tabla 5.12 - Tabla ANOVA para rugosidad media: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Fuente de variación	SDC		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha=5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
<b>PEEK</b>	V <sub>c</sub>	0,032	0,01	2		0,016	0,008	23,71	8,42	6,94		0,2	0,6
	V <sub>a</sub>	14,27	27,9	2		7,13	13,9	1.638	684,8	6,94		99,4	99
	Int.	0,024	0,13	4		0,012	0,06	2,77	3,229	0		0,0	0,2
	Error	0,017	0,08	4		0,004	0,020	/	/	/		0,2	0,1
	Total	14,34	28,2	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK CF30</b>	V <sub>c</sub>	0,03	0,02	2		0,019	0,01	13,30	14,9	6,94		0,5	0,2
	V <sub>a</sub>	8,93	11,1	2		4,465	5,56	763,3	5,92	6,94		99	99
	Int.	0,003	0,003	4		0,001	0,001	0,273	1,85	0		0,2	0,7
	Error	0,023	0,003	4		0,005	0,0009	/	/	/		0,3	0,1
	Total	8,99	11,15	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK GF30</b>	V <sub>c</sub>	0,029	0,10	2		0,014	0,05	9,88	573	6,94		0,5	0,9
	V <sub>a</sub>	13,63	10,8	2		6,815	5,43	3.170	61.110	6,94		99	99
	Int.	0,008	0,003	4		0,004	0,001	2	21,87	0		0,4	0,0
	Error	0,008	0,0003	4		0,002	8 E-05	/	/	/		0,1	0,1
	Total	13,6	10,9	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, Gl –Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance

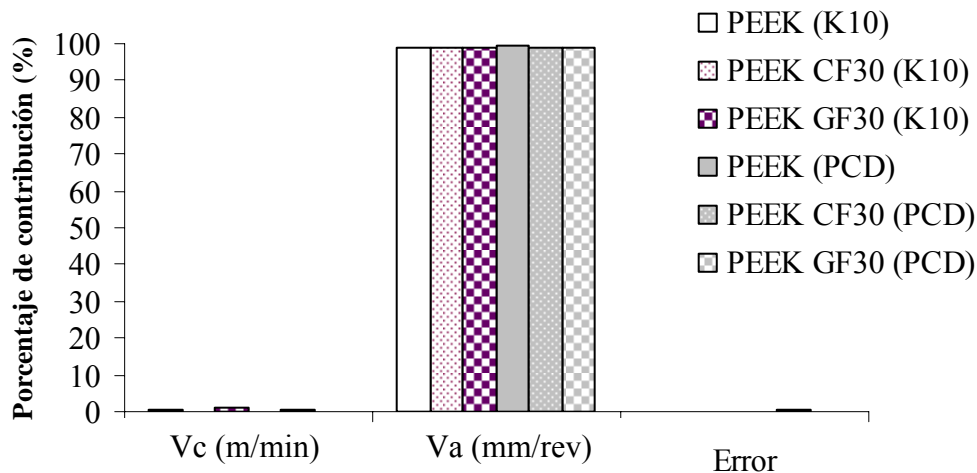


Figura 5.9 – Representación de los porcentajes de contribución:  
Rugosidad media ( $R_a$ ) en poli (éter-éter-cetonas)

La Tabla 5.13 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la rugosidad máxima ( $R_t$ ). La última columna de la Tabla presenta los valores del porcentaje de contribución (P) de cada factor en la varianza total, indicando por tanto el grado de influencia en los resultados. Analizando la Tabla, se puede observar que tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance son significativas sobre la variable dependiente (Test  $F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P(\%) > \text{error}$ ). Además, la velocidad de avance es el factor que tiene una influencia más elevada en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados. La Figura 5.10 muestra los diferentes porcentajes de contribución para cada uno de los factores, así como el error, en cada una de las situaciones analizadas. Se observa claramente cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados en comparación con la velocidad de corte. De hecho, al igual que ocurría para la rugosidad media, hablamos de porcentajes por encima del 97% en todos los casos. Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas. Por otra parte, el error representa un porcentaje prácticamente nulo.

Tabla 5.13 - Tabla ANOVA para la rugosidad máxima: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Fuente de variación	SDC		Gl		Varianza		Test F		F $\alpha=5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
<b>PEEK</b>	V <sub>c</sub>	1,51	1,2	2		0,75	0,61	19,2	18,81	6,94		0,9	0,3
	V <sub>a</sub>	202,1	404	2		101	202	452,8	6.180	6,94		97,7	99,3
	Int.	1,90	1,46	4		0,95	0,73	4,27	22,40	0		0,5	0,3
	Error	0,89	0,13	4		0,22	0,03	/	/	/		0,5	0,1
	Total	206	407	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK CF30</b>	V <sub>c</sub>	0,70	2,48	2		0,35	1,24	37,81	49,60	6,94		0,4	1,1
	V <sub>a</sub>	178	220	2		89	110	9.538	4.408	6,94		99,0	98,5
	Int.	1,06	0,68	4		0,53	0,34	57,27	13,71	0		0,6	0,3
	Error	0,03	0,10	4		0,009	0,02	/	/	/		0,0	0,1
	Total	179	224	8		/	/	/	/	/		100	100
<b>PEEK GF30</b>	V <sub>c</sub>	2,78	8,13	2		1,39	4,06	8,58	12,49	6,94		0,9	4,0
	V <sub>a</sub>	262	308,86	2		131,4	154,4	809	94,55	6,94		98,2	93,9
	Int.	0,95	1,90	4		0,47	0,953	2,94	0,58	0		0,4	0,6
	Error	0,64	6,53	4		0,16	1,63	/	/	/		0,5	1,5
	Total	267	325,4	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, Gl –Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance

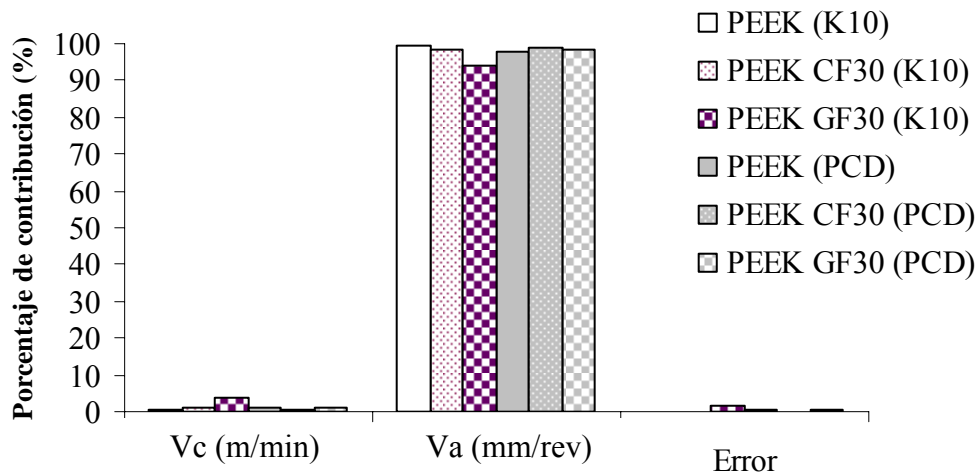


Figura 5.10 – Representación de los porcentajes de contribución: Rugosidad máxima (Rt) en poli (éter-éter-cetonas)

#### 5.4. Modelos de predicción

A partir de los datos experimentales, se plantean a continuación diferentes correlaciones obtenidas mediante análisis de regresión lineal múltiple. Estas ecuaciones no son sino modelos de predicción dentro de un rango de variación de las condiciones de corte. La utilización de estos modelos permitirá aproximar los valores de los diferentes parámetros seleccionados ( $F_m$ ,  $P_c$ ,  $K_s$ ,  $R_a$ ,  $R_t$ ) sin necesidad de realizar ensayos adicionales.

El análisis de regresión múltiple (MRA) es una de las técnicas estadísticas más utilizadas para analizar datos dependientes de varios factores (Sierra, 1994; Pérez, 2002). La expresión general viene dada por:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n + \varepsilon \quad (5.15)$$

Siendo, Y la variable dependiente,  $x_i$  las variables independientes,  $\alpha_i$  son coeficientes y  $\varepsilon$  el error.

De este modo, se obtendrán expresiones de la forma:

$$F_m = \phi_1(V_c, V_a)$$

$$P = \phi_2(V_c, V_a)$$

$$K_s = \phi_3(V_c, V_a)$$

$$R_a = \phi_4(V_c, V_a)$$



$$Rt = \phi_5(V_c, V_a)$$

Siendo  $\Phi_i$  funciones lineales.

En el epígrafe 5.5 se examinará la validez de estos modelos a través de unos tests de validación y del consiguiente cálculo del error.

#### 5.4.1. Poliamidas

Se presentan las correlaciones entre las condiciones de corte ( $V_c$ ,  $V_a$ ) y los parámetros de fuerzas de corte ( $F_m$ ,  $P_c$ ,  $K_s$ ) y de acabado superficial ( $Ra$ ,  $Rt$ ) estudiados. En todos los casos, se han obtenido valores de  $R > 0,95$ . Las Tablas 5.14 a 5.18 presentan los resultados para las poliamidas.

Observando las ecuaciones, se comprueba que el coeficiente que multiplica a  $V_a$  es mucho mayor que el coeficiente que afecta a  $V_c$ , lo que viene a remarcar el mayor peso de la velocidad de avance en el valor de los parámetros, en coherencia con los porcentajes de contribución del análisis ANOVA previo. No obstante, en el caso de la potencia de corte, el coeficiente de peso de  $V_c$  es mayor que en el resto de parámetros, de manera que al multiplicar por el valor de la velocidad de corte (200, 100, 50) se obtiene una contribución significativa, tal y como ocurría en el análisis ANOVA anterior.

Tabla 5.14 – Modelos de predicción para la fuerza de mecanizado: poliamidas

Material	Hr.	Modelos de predicción $F_m$	
<b>PA 6</b>	PCD	$F_m = 11,414 - 7,366 \times 10^{-3} \times V_c + 356 \times V_a$	(5.16)
	K10	$F_m = 15,481 - 2,078 \times 10^{-2} \times V_c + 448,6 \times V_a$	(5.17)
<b>PA 66</b>	PCD	$F_m = 21,183 - 6,803 \times 10^{-2} \times V_c + 428,495 \times V_a$	(5.18)
<b>GF30</b>	K10	$F_m = 66,427 - 0,186 \times V_c + 398,679 \times V_a$	(5.19)

$V_c$  : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 5.15 – Modelos de predicción para la potencia de corte: poliamidas

Material	Hr.	Modelos de predicción $P_c$
<b>PA 6</b>	PCD	$P_c = -95,420 + 0,949 \times V_c + 745,604 \times V_a$ (5.20)
	K10	$P_c = -109,407 + 1,141 \times V_c + 876,69 \times V_a$ (5.21)
<b>PA 66</b>	PCD	$P_c = -99,291 + 0,989 \times V_c + 874,3 \times V_a$ (5.22)
<b>GF30</b>	K10	$P_c = -108,993 + 1,308 \times V_c + 932,311 \times V_a$ (5.24)

$V_c$  : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 5.16 – Modelos de predicción para la fuerza específica de corte: poliamidas

Material	Hr.	Modelos de predicción $K_s$
<b>PA 6</b>	PCD	$K_s = 266,087 - 2,103 \times 10^{-2} \times V_c - 327,78 \times V_a$ (5.25)
	K10	$K_s = 337,043 + 8,923 \times 10^{-3} \times V_c - 481,833 \times V_a$ (5.26)
<b>PA 66</b>	PCD	$K_s = 358,078 - 0,250 \times V_c - 485,719 \times V_a$ (5.27)
<b>GF30</b>	K10	$K_s = 484,851 - 0,273 \times V_c - 877,583 \times V_a$ (5.28)

$V_c$  : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 5.17 – Modelos de predicción para la rugosidad media: poliamidas

Material	Hr.	Modelos de predicción $R_a$
<b>PA 6</b>	PCD	$R_a = -0,648 - 4,238 \times 10^{-4} \times V_c + 18,433 \times V_a$ (5.29)
	K10	$R_a = -0,966 - 2,428 \times 10^{-4} \times V_c + 24,7 \times V_a$ (5.30)
<b>PA 66</b>	PCD	$R_a = -0,526 - 9,047 \times 10^{-4} \times V_c + 19,023 \times V_a$ (5.31)
<b>GF30</b>	K10	$R_a = 0,01 - 3,571 \times 10^{-4} \times V_c + 17,671 \times V_a$ (5.32)

$V_c$ : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 5.18 – Modelos de predicción para la rugosidad máxima: poliamidas

Material	Hr.	Modelos de predicción $R_t$
<b>PA 6</b>	PCD	$R_t = 0,25 - 6,657 \times 10^{-3} \times V_c + 71,371 \times V_a$ (5.33)
	K10	$R_t = -1,197 - 4,661 \times 10^{-3} \times V_c + 91,023 \times V_a$ (5.34)
<b>PA 66</b>	PCD	$R_t = -0,155 + 5,761 \times 10^{-4} \times V_c + 81,519 \times V_a$ (5.35)
<b>GF30</b>	K10	$R_t = 5,626 - 4,066 \times 10^{-3} \times V_c + 79,947 \times V_a$ (5.36)

$V_c$ : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

#### 5.4.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

Se presentan las correlaciones entre las condiciones de corte ( $V_c$ ,  $V_a$ ) y los parámetros de fuerzas de corte ( $F_m$ ,  $P_c$ ,  $K_s$ ) y de acabado superficial ( $R_a$ ,  $R_t$ ) estudiados. En todos los casos, se han obtenido valores de  $R > 0,95$ . Las Tablas 5.19 a 5.23 presentan los resultados para las poli (éter-éter-cetonas).

Observando las ecuaciones, se comprueba que el coeficiente que multiplica a  $V_a$  es mucho mayor que el coeficiente que afecta a  $V_c$ , lo que viene a remarcar el mayor peso de la velocidad de avance en el valor de los parámetros, en coherencia con los resultados previos del análisis ANOVA previo. No obstante, en el caso de la potencia de corte, el coeficiente de peso de  $V_c$  es mayor que en el resto de parámetros, de manera que al multiplicar por el valor de la velocidad de corte (200, 100, 50) se obtiene una contribución significativa, tal y era de esperar.

Tabla 5.19 – Modelos de predicción para la fuerza de mecanizado: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Hr.	Modelos de predicción $F_m$	
<b>PEEK</b>	PCD	$F_m = 17,339 - 4,652 \times 10^{-2} \times V_c + 550,033 \times V_a$	(5.37)
	K10	$F_m = 19,228 - 4,84 \times 10^{-2} \times V_c + 509,585 \times V_a$	(5.38)
<b>PEEK</b> <b>CF30</b>	PCD	$F_m = 44,854 - 9,736 \times 10^{-2} \times V_c + 453,947 \times V_a$	(5.39)
	K10	$F_m = 19,311 - 2,671 \times 10^{-3} \times V_c + 607,685 \times V_a$	(5.40)
<b>PEEK</b> <b>GF30</b>	PCD	$F_m = 43,801 - 3,34 \times 10^{-2} \times V_c + 337,219 \times V_a$	(5.41)
	K10	$F_m = 34,446 - 7,34 \times 10^{-2} \times V_c + 359,608 \times V_a$	(5.42)

$V_c$ : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 5.20 – Modelos de predicción para la potencia de corte: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Hr.	Modelos de predicción $P_c$	
<b>PEEK</b>	PCD	$P_c = -140,911 + 1,289 \times V_c + 1109,838 \times V_a$	(5.43)
	K10	$P_c = -126,177 + 1,249 \times V_c + 1041,538 \times V_a$	(5.44)
<b>PEEK</b> <b>CF30</b>	PCD	$P_c = -125,979 + 1,399 \times V_c + 972,680 \times V_a$	(5.45)
	K10	$P_c = -129,758 + 1,399 \times V_c + 1037,919 \times V_a$	(5.46)
<b>PEEK</b> <b>GF30</b>	PCD	$P_c = -106,89 + 1,1773 \times V_c + 826,033 \times V_a$	(5.47)
	K10	$P_c = -90,155 + 1,07 \times V_c + 764,49 \times V_a$	(5.48)

$V_c$ : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 5.21 – Modelos de predicción para la fuerza específica de corte: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Hr.	Modelos de predicción $K_s$	
<b>PEEK</b>	PCD	$K_s = 394,166 - 0,172 \times V_c - 430,714 \times V_a$	(5.49)
	K10	$K_s = 386,307 - 0,163 \times V_c - 444,852 \times V_a$	(5.50)
<b>PEEK</b> <b>CF30</b>	PCD	$K_s = 473,608 - 0,154 \times V_c - 894,476 \times V_a$	(5.51)
	K10	$K_s = 444,407 - 8,018 \times 10^{-2} \times V_c - 729,266 \times V_a$	(5.52)
<b>PEEK</b> <b>GF30</b>	PCD	$K_s = 473,211 - 0,248 \times V_c - 1050,428 \times V_a$	(5.53)
	K10	$K_s = 436,518 - 0,35 \times V_c - 852,685 \times V_a$	(5.54)

$V_c$ : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 5.22 – Modelos de predicción para la rugosidad media: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Hr.	Modelos de predicción $R_a$	
<b>PEEK</b>	PCD	$R_a = -0,681 - 9,476 \times 10^{-4} \times V_c + 19,538 \times V_a$	(5.55)
	K10	$R_a = -1,266 - 4,761 \times 10^{-4} \times V_c + 27,652 \times V_a$	(5.56)
<b>PEEK</b> <b>CF30</b>	PCD	$R_a = -0,276 - 1,042 \times 10^{-3} \times V_c + 15,7 \times V_a$	(5.57)
	K10	$R_a = -0,386 - 8,761 \times 10^{-4} \times V_c + 17,509 \times V_a$	(5.58)
<b>PEEK</b> <b>GF30</b>	PCD	$R_a = -0,291 - 8,857 \times 10^{-4} \times V_c + 19,242 \times V_a$	(5.59)
	K10	$R_a = 0,227 - 1,647 \times 10^{-3} \times V_c + 17,509 \times V_a$	(5.60)

$V_c$ : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 5.23 – Modelos de predicción para la rugosidad máxima: poli (éter-éter-cetonas)

Material	Hr.	Modelos de predicción $R_t$
<b>PEEK</b>	PCD	$R_t = -0,405 - 6,242 \times 10^{-3} \times V_c + 72,485 \times V_a$ (5.61)
	K10	$R_t = -3,52 + 2,214 \times 10^{-3} \times V_c + 105,157 \times V_a$ (5.62)
<b>PEEK</b> <b>CF30</b>	PCD	$R_t = 1,385 - 3,776 \times 10^{-3} \times V_c + 68,623 \times V_a$ (5.63)
	K10	$R_t = 1,449 - 8,252 \times 10^{-3} \times V_c + 77,219 \times V_a$ (5.64)
<b>PEEK</b> <b>GF30</b>	PCD	$R_t = 3,14 - 4,619 \times 10^{-3} \times V_c + 85,509 \times V_a$ (5.65)
	K10	$R_t = 1,085 - 9,34 \times 10^{-3} \times V_c + 90,45 \times V_a$ (5.66)

$V_c$ : velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : velocidad de avance (mm/rev)

### 5.5 Validación del modelo estadístico

Se ha realizado un análisis de los residuos, no obteniéndose en ningún caso tendencias significativas.

A continuación, se procederá a verificar la bondad de las aproximaciones anteriores, comparando los resultados del modelo estadístico para ciertos valores de condiciones de corte intermedios con los resultados obtenidos experimentalmente. La comparación se evidenciará mediante el error relativo cometido en cada aproximación. El error se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Error(\%) = \frac{|V_m - V_{exp}|}{V_{exp}} \times 100 \quad (5.66)$$

siendo,  $V_m$  el valor obtenido aplicando modelo (Ecs. 16 a 65) y  $V_{exp}$  el valor experimental. La Tabla 5.24 presenta los parámetros de corte utilizados en los ensayos o tests de confirmación.

Tabla 5.24 - Parámetros de corte utilizados en los ensayos de confirmación

Ensayo	$V_c$ (m/min)	$V_a$ (mm/rev)
1c	200	0.15
2c	100	0.15
3c	50	0.15

### 5.5.1. Poliamidas

Las Tablas 5.25 a 5.29 presentan las validaciones de los respectivos modelos propuestos, para cada uno de los parámetros seleccionados. Como se comprobará, teniendo en cuenta los valores de error obtenidos, se puede concluir que los modelos desarrollados permiten predecir los valores de los parámetros analizados con un razonable grado de aproximación, bajo las condiciones frontera establecidas.

Tabla 5.25 – Validación del modelo experimental de las poliamidas:  $F_m$

Material	Ensayo	Fuerza de mecanizado ( $F_m$ ) (N)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PA 6		PCD	K10	Ec. 16	Ec. 17	PCD	K10
	1	63,11	76,39	63,34	78,77	0,36	3,1
	2	64,42	81,54	64,07	80,77	0,54	0,94
	3	64,42	83,06	64,44	81,77	0,21	1,5
PA 66 GF30		PCD	K10	Ec. 18	Ec. 19	PCD	K10
	1	73,32	93,81	71,85	89,02	2	5,1
	2	78,52	100,76	78,65	107,6	0,16	6,7
	3	82,35	115,20	82,05	116,89	0,36	1,4

\* Media de 2 medidas

Tabla 5.26 – Validación del modelo experimental de las poliamidas:  $P_c$

Material	Ensayo	Potencia de corte ( $P_c$ ) (W)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PA 6		PCD	K10	Ec.20	Ec. 21	PCD	K10
	1	242,82	270,4	222,84	250,3	8,2	7,4
	2	104,32	129,54	111,42	136,2	6,7	5,1
	3	60,32	75,50	63,92	79,15	5,9	4,8
PA 66 GF30		PCD	K10	Ec. 22	Ec. 23	PCD	K10
	1	261,25	318,53	229,65	292,45	12	7,8
	2	125,53	148,80	130,75	161,65	4,1	8,6
	3	72,76	90,70	80,60	96,25	12,6	6,1

\* Media de 2 medidas

Tabla 5.27 – Validación del modelo experimental de las poliamidas:  $K_s$

Material	Ensayo	Fuerza específica de corte ( $K_s$ ) (N/mm <sup>2</sup> )					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PA 6		PCD	K10	Ec. 24	Ec. 25	PCD	K10
	1	239,36	246,26	212,71	266,36	11,1	8,1
	2	209,48	260,13	214,81	265,56	2,5	2
	3	242,28	263,08	215,86	265,16	10,9	0,5
PA 66 GF30		PCD	K10	Ec. 26	Ec. 27	PCD	K10
	1	237,93	290,10	235,21	299,21	1,1	3,1
	2	252,08	298,80	260,21	326,21	3,2	9,1
	3	260,10	324,11	272,71	339,71	4,8	4,8

\* Media de 2 medidas

Tabla 5.28 – Validación del modelo experimental de las poliamidas:  $R_a$

Material	Ensayo	Rugosidad media ( $R_a$ ) ( $\mu\text{m}$ )					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PA 6		PCD	K10	Ec. 28	Ec. 29	PCD	K10
	1	1,78	2,41	2,04	2,69	14,6	11,6
	2	1,97	2,44	2,08	2,72	5,5	11,4
	3	2,02	2,53	2,10	2,73	3,9	7,9
PA 66 GF30		PCD	K10	Ec. 30	Ec. 31	PCD	K10
	1	1,81	2,37	2,14	2,58	13,2	9,1
	2	1,97	2,45	2,23	2,62	13,1	6,9
	3	2,18	2,54	2,28	2,64	4,5	3,9

\* Media de 10 medidas

Tabla 5.29 – Validación del modelo experimental de las poliamidas:  $R_t$

Material	Ensayo	Rugosidad máxima ( $R_t$ ) ( $\mu\text{m}$ )					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PA 6		PCD	K10	Ec. 32	Ec. 33	PCD	K10
	1	8,55	10,59	9,62	11,53	12,5	8,8
	2	9,24	10,99	10,28	11,99	11,2	9
	3	9,75	11,35	10,62	12,23	8,9	7,7
PA 66 GF30		PCD	K10	Ec. 34	Ec. 35	PCD	K10
	1	10,68	14,95	12,09	16,81	13,2	12,4
	2	11,12	15,66	12,12	17,21	8,9	9,8
	3	11,18	16,28	12,18	17,41	8,9	6,9

\* Media de 10 medidas

### 5.5.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

Las Tablas 5.30 a 5.34 presentan las validaciones de los respectivos modelos propuestos, para cada uno de los parámetros seleccionados. Como se comprobará, teniendo en cuenta



los valores de error obtenidos, se puede concluir que los modelos desarrollados permiten predecir los valores de los parámetros analizados con un razonable grado de aproximación, bajo las condiciones frontera establecidas.

Tabla 5.30 – Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas):  $F_m$

Material	Ensayo	Fuerza de mecanizado ( $F_m$ ) (N)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PEEK		PCD	K10	Ec. 36	Ec. 37	PCD	K10
	1	76,71	87,87	73,58	87,7	4	0,19
	2	78,84	96,02	80,98	91,04	2,7	5,1
	3	88,58	91,59	84,68	92,71	4,4	1,2
PEEK CF30		PCD	K10	Ec. 38	Ec. 39	PCD	K10
	1	85,72	89,94	85,98	91,84	0,3	2,1
	2	90,22	95,88	90,82	95,84	0,6	0,04
	3	95,65	98,97	93,24	97,84	2,5	1,1
PEEK GF30		PCD	K10	Ec. 40	Ec. 41	PCD	K10
	1	97,06	110,50	93,54	109,91	3,6	0,5
	2	101,45	118,20	103,24	110,18	1,7	6,7
	3	110,32	121,50	108,09	110,31	2	9,2

\* Media de 2 medidas

Tabla 5.31 – Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas):  $P_c$

Material	Ensayo	Potencia de corte ( $P_c$ ) (W)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PEEK		PCD	K10	Ec. 42	Ec. 43	PCD	K10
	1	267,01	284,63	238,65	252,41	10,6	11,3
	2	123,82	129,09	131,58	134,71	6,2	4,3
	3	68,66	70,54	78,05	75,86	13,6	7,5
PEEK CF30		PCD	K10	Ec. 44	Ec. 45	PCD	K10
	1	308,83	320,57	279,85	283,52	9,3	11,5
	2	145,59	145,39	154,95	154,54	6,4	6,2
	3	85,26	82,69	92,50	90,05	8,4	8,9
PEEK GF30		PCD	K10	Ec. 46	Ec. 47	PCD	K10
	1	334,67	342,13	299,73	305,73	10,4	10,6
	2	151,79	159,98	159,83	165,83	5,2	3,6
	3	85,89	93,12	89,98	95,88	4,7	2,6

\* Media de 2 medidas

Tabla 5.32 – Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas):  $K_s$

Material	Ensayo	Fuerza específica de corte ( $K_s$ ) (N/mm <sup>2</sup> )					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
		PCD	K10	Ec. 48	Ec. 49	PCD	K10
PEEK	1	243,18	259,23	238,60	266,04	1,8	2,6
	2	248,65	280,56	273,60	290,84	10	3,6
	3	275,75	275,30	291,1	303,24	5,5	10,1
		PCD	K10	Ec. 50	Ec. 51	PCD	K10
PEEK CF30	1	281,26	291,96	286,97	295,26	2	1,1
	2	292,35	308,36	303,27	312,46	3,7	1,3
	3	306,26	315,40	311,44	321,06	1,6	1,7
		PCD	K10	Ec. 52	Ec. 53	PCD	K10
PEEK GF30	1	304,80	311,60	308,62	319,01	1,2	2,4
	2	302,30	321,25	324,02	327,01	7,1	1,7
	3	314,43	333,85	331,72	331,01	5,4	0,85

\* Media de 2 medidas

Tabla 5.33 – Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas):  $R_a$

Material	Ensayo	Rugosidad media ( $R_a$ ) ( $\mu\text{m}$ )					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
		PCD	K10	Ec. 54	Ec. 55	PCD	K10
PEEK	1	1,21	1,77	1,10	2,06	9	16,3
	2	1,66	1,92	1,75	2,15	5,4	11,9
	3	1,88	1,94	2,07	2,20	10,1	13,4
		PCD	K10	Ec. 56	Ec. 57	PCD	K10
PEEK CF30	1	1,74	2,48	1,87	2,41	7,4	2,8
	2	1,81	2,82	1,97	2,50	8,8	11,3
	3	1,90	2,64	2,03	2,55	6,8	3,4
		PCD	K10	Ec. 58	Ec. 59	PCD	K10
PEEK GF30	1	2,14	2,51	2,15	2,78	0,41	10,7
	2	2,24	2,57	2,24	2,83	0	10,1
	3	2,27	2,69	2,29	2,85	0,74	5,9

\* Media de 10 medidas

Tabla 5.34 – Validación del modelo experimental de las poli (éter-éter-cetonas): Rt

Material	Ensayo	Rugosidad máxima (Rt) ( $\mu\text{m}$ )					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PEEK		PCD	K10	Ec. 60	Ec. 61	PCD	K10
	1	9,47	10,82	9,22	11,81	2,6	9,1
	2	8,95	12,00	9,84	12,03	9,9	0,25
	3	9,56	12,15	10,16	12,14	6,2	0,08
PEEK CF30		PCD	K10	Ec. 62	Ec. 63	PCD	K10
	1	9,50	10,50	10,91	11,38	14,8	8,3
	2	9,93	11,02	11,29	12,20	13,6	10,7
	3	10,00	11,24	11,48	12,61	14,8	13,3
PEEK GF30		PCD	K10	Ec. 64	Ec. 65	PCD	K10
	1	13,80	17,74	12,84	15,04	6,9	13,1
	2	15,69	17,78	13,74	15,50	12,4	12,8
	3	16,32	18,01	14,19	15,73	13	12,6

\* Media de 10 medidas

## 5.6. Discusión de los resultados

El análisis de varianza (ANOVA) ha permitido determinar la influencia de cada uno de los factores en las variables dependientes estudiadas. Se ha demostrado como en todos los parámetros estudiados, excepto en la potencia de corte, la velocidad de avance juega un papel preeminente, con porcentajes de contribución por encima del 80% en todos los casos. Respecto de la potencia de corte, existe un equilibrio entre los dos factores analizados, si bien los mayores porcentajes corresponden a la velocidad de corte, como por otra parte era de esperar, dado que la potencia de corte depende directamente de este factor en su definición.

La influencia del material, tanto para poliamidas como para poli (éter-éter-cetonas), es poco significativa, especialmente en el caso de la rugosidad. Tan sólo en la fuerza de mecanizado se observa un porcentaje de contribución menor (mayor) para la velocidad de avance (velocidad de corte) cuando nos referimos a los materiales reforzados.

Igualmente poco significativa es la influencia de la herramienta, en particular en el caso de la rugosidad.

En este estudio, los factores presentan significado físico y estadístico,  $\text{Test } F > F_{\alpha=5\%}$  y el  $P (\%) > \text{error}$ .

Teniendo en cuenta los errores obtenidos, se puede concluir que los modelos desarrollados

mediante la técnica de análisis de regresión lineal múltiple se pueden utilizar para predecir los valores con un razonable grado de aproximación, siempre y cuando las condiciones de corte seleccionadas pertenezcan al intervalo límite con el que se efectuaron los ensayos.

Se ha puesto de manifiesto la importancia del análisis estadístico para aportar información de interés desde el punto de vista del estudio de la maquinabilidad de estos materiales. Asimismo, las técnicas seleccionadas han permitido, por un lado, evidenciar el efecto de la velocidad de corte y la velocidad de avance en los resultados obtenidos y, por otro, establecer modelos de predicción de cada uno de los parámetros estudiados, dentro de un determinado rango de tolerancia.

# Capítulo 6

## 6. Análisis experimental de la maquinabilidad

### 6.1. Generalidades

### 6.2. Definición de maquinabilidad

### 6.3. Fuerza y potencia de corte

#### 6.3.1. Poliamidas

#### 6.3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

### 6.4. Acabado superficial

#### 6.4.1. Poliamidas

#### 6.4.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

### 6.5. Efecto de la profundidad de pasada

#### 6.5.1. Poliamidas

##### 6.5.1.1. Fuerza y potencia de corte

##### 6.5.1.2. Acabado superficial

#### 6.5.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

##### 6.5.2.1. Fuerza y potencia de corte

##### 6.5.2.2. Acabado superficial

### 6.6. Efecto de la herramienta

#### 6.6.1. Poliamidas

##### 6.6.1.1. Fuerza y potencia de corte

##### 6.6.1.2. Acabado superficial

##### 6.6.1.3. Tipo de viruta

#### 6.6.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

##### 6.6.2.1. Fuerza y potencia de corte

##### 6.6.2.2. Acabado superficial

##### 6.6.2.3. Tipo de viruta

### 6.7. Productividad de la herramienta

### 6.8. Propuesta de índice de maquinabilidad

#### 6.8.1. Poliamidas

#### 6.8.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

### 6.9. Discusión de resultados

# Capítulo 6

## **6. Análisis experimental de la maquinabilidad**

### **6.1. Generalidades**

En este capítulo se estudiará la maquinabilidad de los materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibras, mediante del análisis de las fuerzas de corte (fuerza de mecanizado, potencia de corte y fuerza específica de corte) y del acabado superficial (parámetros Ra y Rt). Para la correcta caracterización de la maquinabilidad, se analizará el efecto de los parámetros funcionales de corte (velocidad de corte, velocidad de avance y profundidad de pasada) y de la herramienta (material y geometría) sobre las fuerzas de corte y el acabado superficial, para cada uno de los materiales ensayados. Se propondrá un nuevo índice de maquinabilidad para estos materiales, cuya validez ha sido probada en algunos trabajos previos ya publicados, sobre materiales compuestos de matriz

termoestable (Davim y Mata, 2005-b y 2007; Mata y Davim, 2004-b). Finalmente, se estudiará el estado de la herramienta tras el proceso de mecanizado, calculando el volumen total de material removido por la misma y verificando la existencia o no de desgaste.

En cada apartado, se presentarán en primer lugar los resultados obtenidos con las poliamidas (PA 6 y PA 66-GF30), materiales de la familia de los termoplásticos más utilizadas hasta la fecha, y, posteriormente, los resultados obtenidos con las poli (éter-éter-cetonas) (PEEK, PEEK CF30 y PEEK GF30), materiales avanzados de altas prestaciones con enormes potencialidades de cara al futuro en multitud de aplicaciones.

## 6.2. Definición de maquinabilidad

La maquinabilidad de un material, esto es, la mayor o menor facilidad con la que puede ser conformado por arranque de viruta, se define convencionalmente en función de cuatro criterios, a saber (Kalpakjian y Schmid, 2002):

- acabado e integridad superficial de la parte mecanizada
- requerimientos de fuerza y potencia
- duración de la herramienta
- control de la viruta

Una buena maquinabilidad se traduce en un buen acabado superficial, bajos requerimientos de fuerza y potencia y larga vida de la herramienta. Respecto del control de la viruta, las virutas largas y delgadas, si no se rompen, pueden interferir con las operaciones de corte, al enredarse en la zona de corte, por lo que en esos casos se hará imprescindible recurrir a herramientas dotadas de rompe virutas.

Por tanto, la maquinabilidad no puede ser entendida como una propiedad del material en sentido estricto, ya que, como se ve, depende de un conjunto complejo de factores, algunos de los cuales son externos al propio material en estudio (Groover, 1996; Davim, 1997).

Respecto de las características del material, es preciso tener en cuenta su composición química, microestructura, dureza y propiedades físicas. El tipo de operación y las condiciones particulares de mecanizado también afectan de modo significativo a la maquinabilidad; en particular: el material y la geometría de la herramienta, los parámetros funcionales del proceso de corte (velocidad de corte, velocidad de avance y profundidad de pasada), la rigidez del sistema, el modo de funcionamiento (corte continuo o interrumpido), etc.

Con relación a la influencia de los parámetros funcionales de corte, la serie principal de ensayos se efectuó, tal y como quedó reflejado en el Capítulo 3, variando las velocidades de corte y avance, y manteniendo constante la profundidad de pasada. Por ello, en los epígrafes 6.3 y 6.4, donde se analizan, respectivamente, las fuerzas de corte y el acabado superficial, se evidencia la evolución de cada uno de los parámetros seleccionados ( $F_m$ ,  $P_c$ ,  $K_s$ ,  $R_a$  y  $R_t$ ) en función de las velocidades de corte y de avance. Se reserva para el epígrafe 6.5 el análisis del efecto de la profundidad pasada, para unas velocidades de corte y avance fijas, sobre las fuerzas de corte y el acabado superficial.

Por tratarse de los materiales más utilizados históricamente en la ingeniería, la maquinabilidad de los aceros está ampliamente estudiada. De hecho, se han establecido diferentes técnicas para mejorarla, principalmente agregando plomo, azufre u otros elementos similares. Dentro de la extensa gama de materiales metálicos, ciertos metales como el aluminio ofrecen buena maquinabilidad y, por el contrario, aleaciones como las de base níquel o titanio son difíciles de mecanizar.

La maquinabilidad de los materiales cerámicos ha mejorado de forma gradual, con el desarrollo de los nanocerámicos y con la selección de parámetros adecuados de proceso, como por ejemplo el corte en régimen dúctil.

Los materiales compuestos de matriz metálica y de matriz cerámica pueden ser difíciles de mecanizar, dependiendo de las propiedades de los componentes individuales, es decir, de las fibras o triquitas de refuerzo, así como del material de la matriz.

Para conseguir una buena maquinabilidad en los materiales poliméricos, tanto termoplásticos como termoestables, se requieren herramientas con ángulos de ataque positivos (para reducir las fuerzas de corte), grandes ángulos de incidencia, pequeñas profundidades de corte y pequeños avances, velocidades de corte relativamente altas y herramientas bien afiladas.

Debido a la presencia de fibras, los materiales plásticos reforzados son muy abrasivos y difíciles de mecanizar. Los problemas mayores son el rasgado y delaminado, que pueden provocar una gran reducción en la capacidad de carga del componente. Además, para mecanizar estos materiales se requiere la eliminación cuidadosa de los productos de mecanizado para evitar el contacto y la inhalación de las fibras.

En cuanto a la refrigeración, puede ser necesaria para evitar que las virutas se adhieran a las herramientas, especialmente cuando se trabaja a velocidades elevadas. La reducción de



la temperatura en la zona de corte se puede lograr mediante chorro de aire, niebla de vapor o aceites hidrosolubles (*Kalpakjian y Schmid, 2002*); si bien es preciso cuidar mucho este aspecto, al tratarse de materiales especiales que pueden absorber parte del fluido de corte, modificando sus propiedades.

Debido a las características de los materiales ensayados en este trabajo de investigación, no se tendrá en cuenta el desgaste de la herramienta como criterio de maquinabilidad, ya que no se realizaron expresamente ensayos de larga duración, que hubiesen permitido analizar la evolución del desgaste para cada tipo de herramienta y material mecanizado. Al tratarse de materiales hoy por hoy muy caros y requerirse una gran cantidad de material para analizar con rigor el desgaste, se decidió prescindir de este tipo de tests. Por ello, en cuanto al desgaste de la herramienta de corte, sólo es posible aportar información en términos de volumen de material removido (MRR) y documentar algún caso de desgaste.

Como se acaba de mencionar, existen multitud de investigaciones que han permitido caracterizar la maquinabilidad de los materiales convencionales y definir un índice de maquinabilidad que permita realizar comparaciones entre diferentes materiales. Sin embargo, en el caso de los materiales compuestos de matriz polimérica (termoestables y termoplásticos) apenas se encuentran referencias que estudien la maquinabilidad (*Rahman et al., 1999-a y 1999-b; El-Sonbaty et al., 2004; Davim et al., 2003; Davim y Reis, 2004-b; Mata y Davim, 2004-a, 2005-a y 2006; Kim et al., 2005*) y propongan índices de maquinabilidad adaptados a las especiales características de estos materiales (*Davim y Mata, 2005 y 2007-a; Mata y Davim, 2004-b*). Por ello, tiene gran interés práctico profundizar en el estudio del mecanizado de estos materiales e intentar aportar resultados que permitan caracterizar adecuadamente su mecanizado y establecer un índice de maquinabilidad de validez general, que tenga en cuenta la influencia de las fuerzas de corte y del acabado.

Los resultados y conclusiones de este trabajo, en lo que afecta a la maquinabilidad, serán de gran utilidad tanto a los fabricantes de herramientas de corte como para aquellas empresas dedicadas a la conformación de estos materiales mediante el arranque de viruta para diferentes aplicaciones, al menos desde un punto de vista cualitativo.

### 6.3. Fuerza y potencia de corte

El valor relativo de las fuerzas de corte tiene una importancia crucial, ya que afecta a la vida de las herramientas y es un indicador de la maquinabilidad del material. Sobre las fuerzas de corte influyen naturalmente las propiedades mecánicas del material (en particular su dureza), el porcentaje, tipo y orientación de las fibras, las características de la herramienta de corte (material, geometría, estado de la herramienta, etc.) y los parámetros funcionales de corte (velocidad de corte, velocidad de avance y profundidad de pasada).

La Figura 6.1 representa el modelo clásico de una operación de torneado, donde se identifican las tres componentes de la fuerza de corte, la fuerza de corte propiamente dicha ( $F_c$ ), la fuerza de avance ( $F_a$ ) y la fuerza de penetración ( $F_p$ ), así como los parámetros funcionales del proceso de corte.

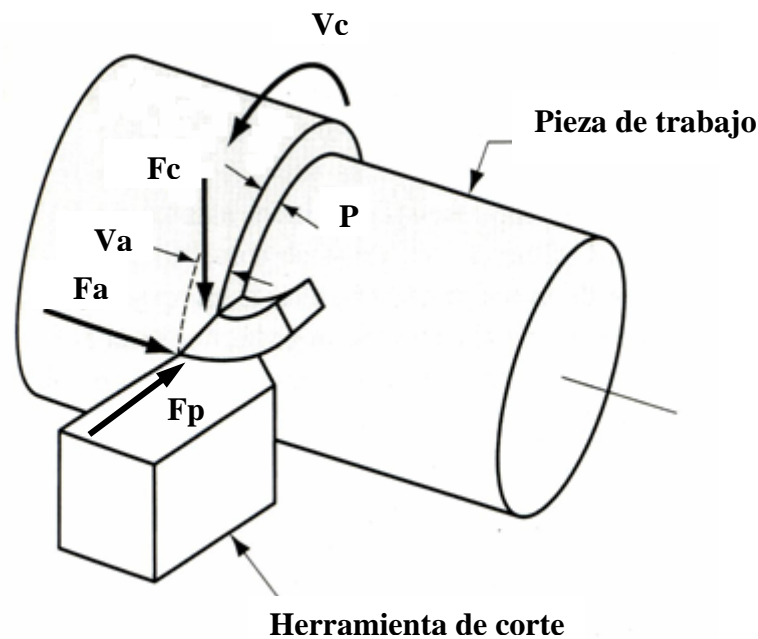


Figura 6.1 – Representación del modelo de torneado cilíndrico

Para analizar la maquinabilidad de estos materiales, centraremos la atención en el estudio de la fuerza de mecanizado, la potencia de corte y la fuerza específica de corte ( $F_m$ ,  $P_c$ ,  $K_s$ ). Los valores de estas variables se pueden calcular recurriendo a las ecuaciones (5.12), (5.13) y (5.14) enunciadas anteriormente.

La fuerza de mecanizado debe entenderse como la fuerza resultante que debe ejercerse sobre la herramienta para que tenga lugar el proceso de corte del material, al interactuar ésta con la pieza a mecanizar. Un material presentará mejor maquinabilidad que otro si la

fuerza de mecanizado necesaria, manteniendo constantes las condiciones de corte, las características de la herramienta y otras condiciones ambientales, es menor.

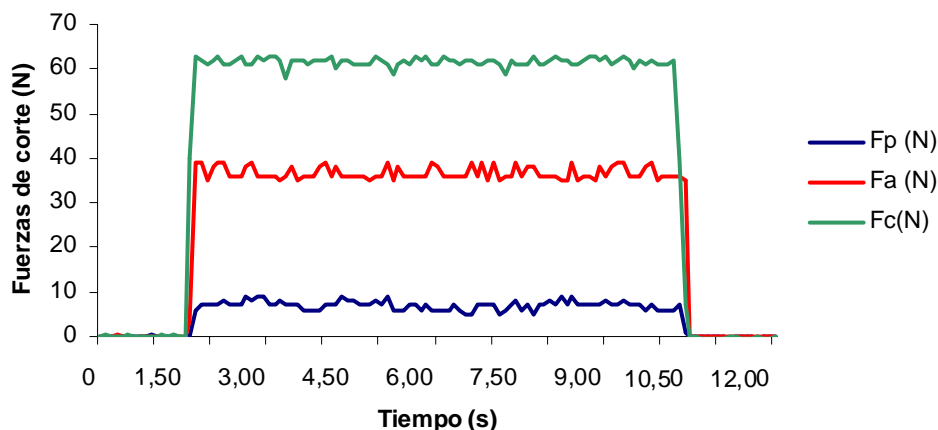
En cuanto a la potencia de corte, proporciona información sobre la energía que es preciso invertir en el proceso de mecanizado para conseguir eliminar el material necesario y alcanzar el acabado deseado (rugosidad, precisión dimensional, tolerancias). Por ello, es importante lograr reducir el valor de la potencia de corte, lo cual implica, lógicamente, reducir las fuerzas de corte, y obliga a intervenir sobre los parámetros funcionales de corte y sobre la herramienta. Un menor consumo de energía se traduce en un menor coste de producción.

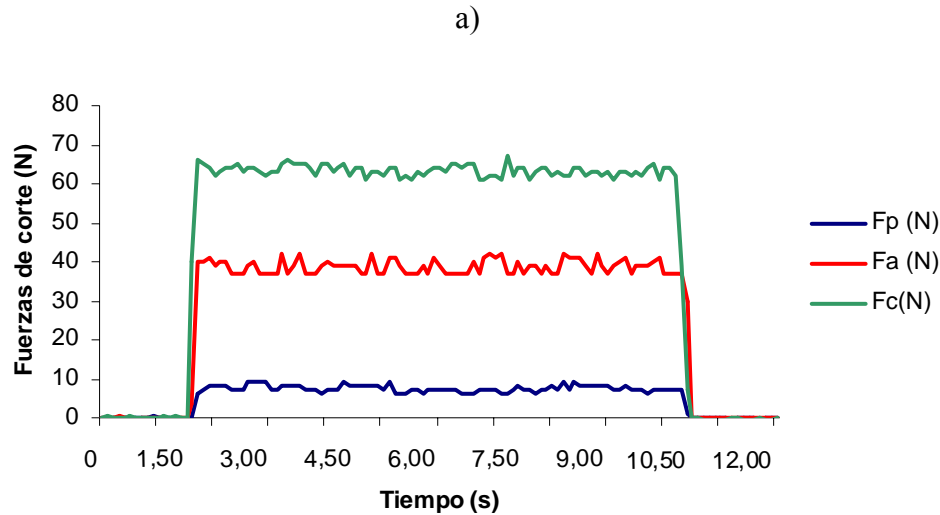
Por otro lado, la fuerza específica de corte o “presión” específica de corte es un indicador más, obtenido a partir de las fuerzas de corte, que proporciona información sobre la eficiencia del proceso de mecanizado. Valores bajos de la fuerza específica de corte corresponden en general con situaciones de buena maquinabilidad.

### 6.3.1. Poliamidas

En el Anexo C se presentan los resultados de las tres componentes de las fuerzas de corte medidas (Tablas C.1 y C.2), así como los valores calculados de la fuerza de mecanizado, potencia de corte y fuerza específica de corte (Tablas C.3 y C.4) para cada uno de los ensayos realizados.

A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 6.2 la evolución con el tiempo de las tres componentes de las fuerzas de corte para el material PA 66-GF30, bajo unas condiciones de corte particulares ( $V_c = 100$  m/min,  $V_a = 0.1$  mm/rev) y para los dos tipos de herramienta (PCD y K10).



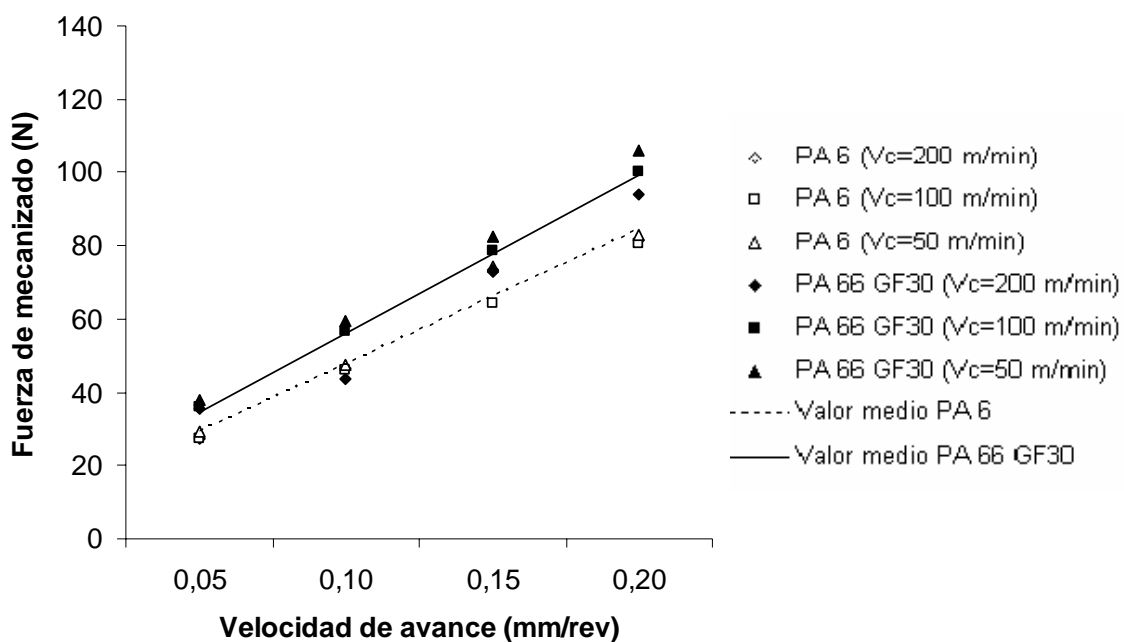


b)

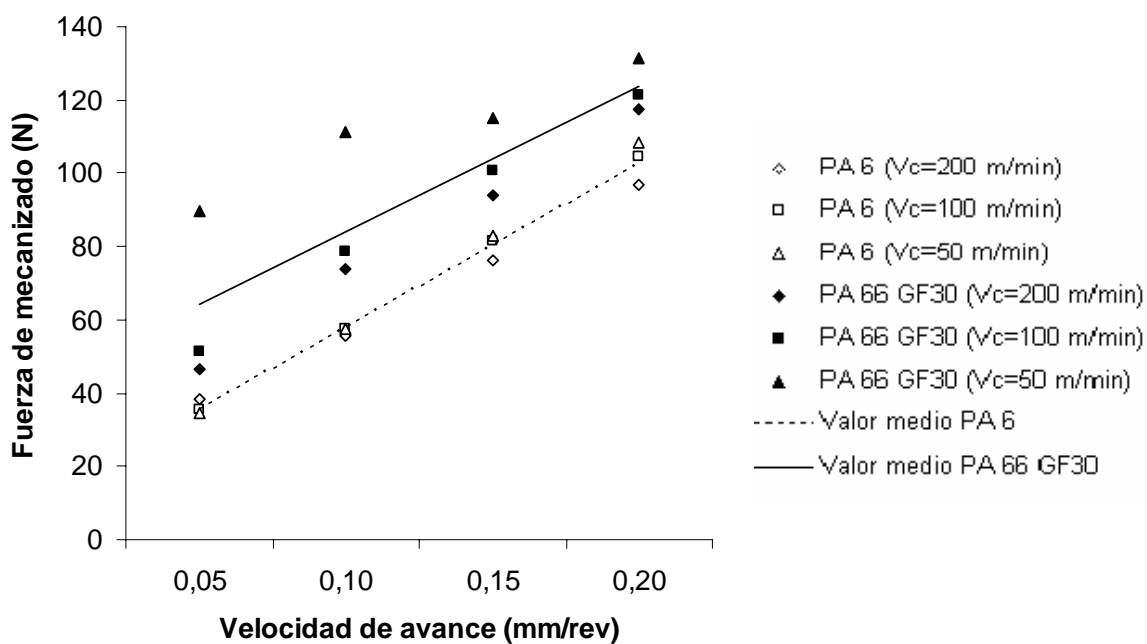
Figura 6.2 – Ejemplo de evolución de las fuerzas de corte para PA 66-GF30:  
a) PCD, b) K10

La Figura 6.3 muestra la evolución de la fuerza de mecanizado en función de las condiciones de corte (velocidad de avance y velocidad de corte) y del tipo de material (PA 6, PA 66-GF30), para los dos tipos de herramienta utilizados. Como se puede apreciar, la fuerza de mecanizado aumenta al aumentar la velocidad de avance y al disminuir la velocidad de corte, siendo el efecto de la velocidad de avance más significativo en todos los casos. En cuanto a la velocidad de corte, tanto sólo en el material reforzado y con la herramienta K10 se evidencia una influencia más destacable. Se evidencia el efecto de las fibras de refuerzo, que se traducen en un incremento importante de la fuerza de mecanizado. Por otra parte, se obtienen valores inferiores de la fuerza de mecanizado trabajando con la herramienta PCD.

La Figura 6.4 muestra la evolución de la potencia de corte en función de los parámetros de corte (velocidad de avance y velocidad de corte) y del tipo de material (PA 6, PA 66-GF30), para los dos tipos de herramienta utilizados.

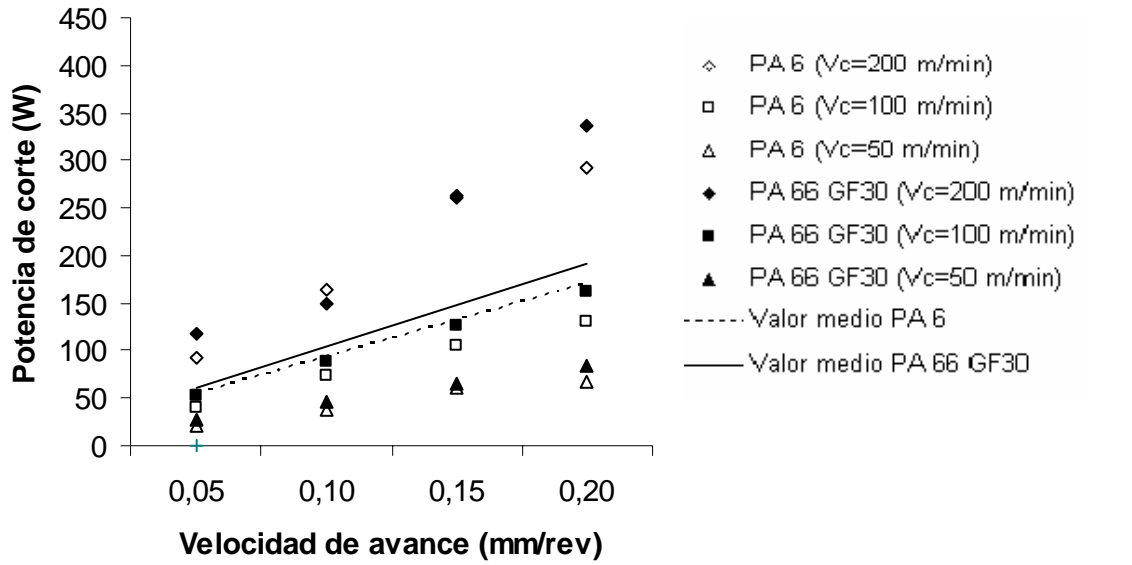


a)

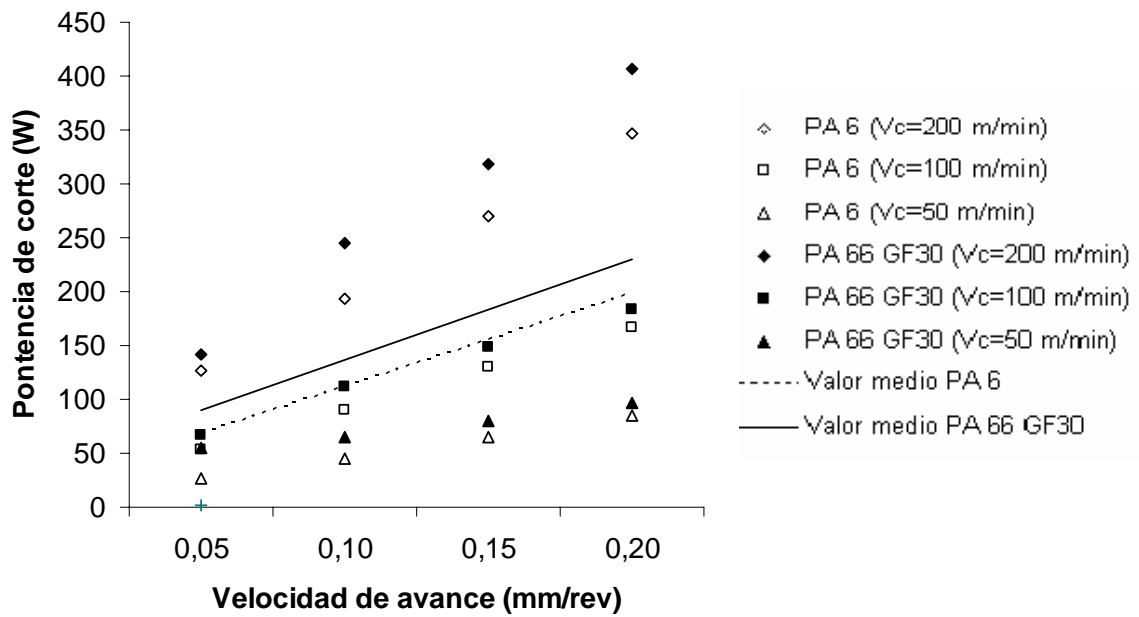


b)

Figura 6.3 - Variación de la fuerza de mecanizado en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P = 2 \text{ mm}$ : a) PCD, b) K10



a)



b)

Figura 6.4 - Variación de la potencia de corte en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P = 2$  mm: a) PCD, b) K10

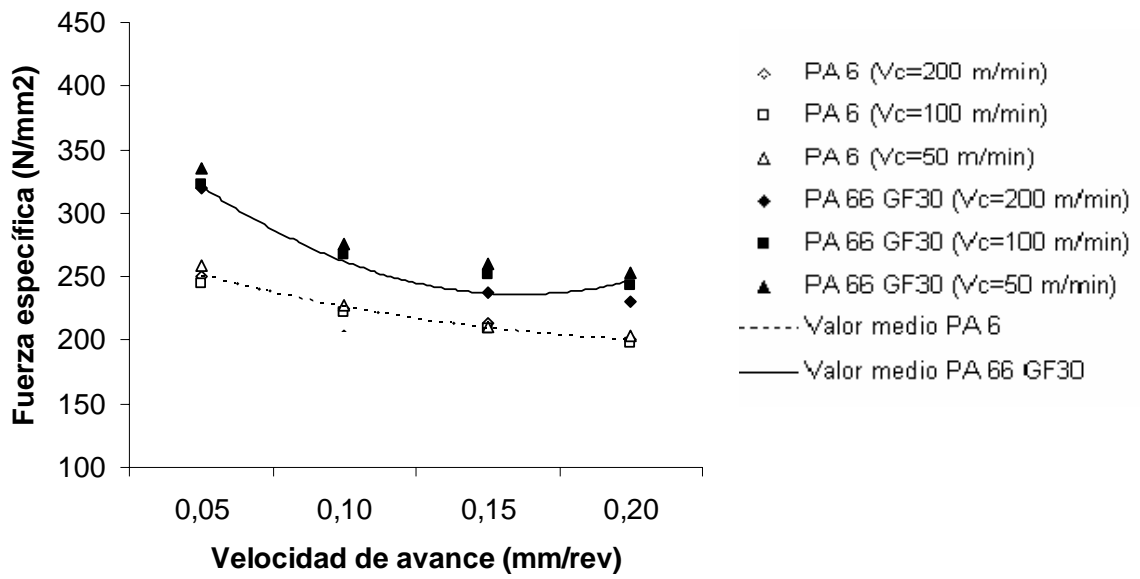
Como se puede observar, la potencia de corte aumenta al incrementar tanto la velocidad de avance como la velocidad de corte, siendo más acusado el efecto de esta última, y especialmente al pasar de  $V_c=100$  m/min a  $V_c=200$  m/min. La variación con la velocidad de avance sigue prácticamente una línea recta. Por otro lado, el efecto de las fibras de refuerzo se manifiesta en valores mayores de la potencia de corte en el material reforzado, con independencia del tipo de herramienta.

Se pone también de manifiesto cómo la utilización de la herramienta de diamante policristalino requiere de un consumo de potencia menor, lo que se traduce directamente en un menor consumo de energía. Por lo demás, la variación de la potencia de corte frente a los parámetros funcionales de corte es similar en los dos casos.

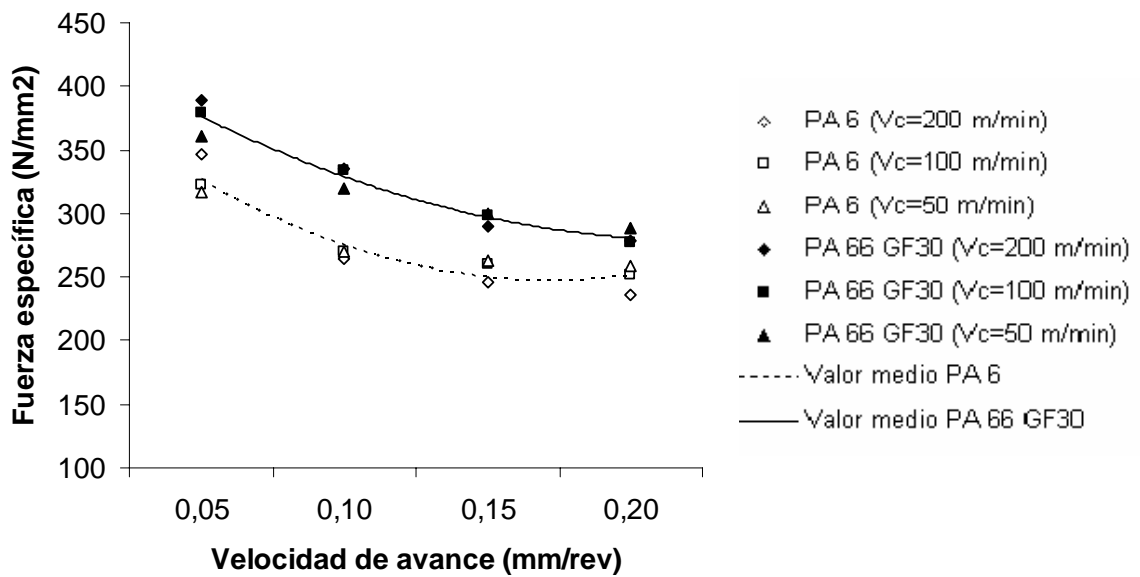
La Figura 6.5 muestra la evolución de la fuerza específica de corte en función de los parámetros de corte (velocidad de avance y velocidad de corte) y del tipo de material (PA 6, PA 66-GF30), para los dos tipos de herramienta utilizados.

Como se puede observar, la fuerza específica de corte disminuye al aumentar tanto la velocidad de avance como la velocidad de corte, si bien el efecto de esta última es menos significativo, en particular para el material no reforzado. El efecto de las fibras de vidrio se traduce en un incremento notable de la fuerza específica de corte, lo cual viene a remarcar la peor maquinabilidad de los materiales reforzados, como era de esperar.

Se pone también de manifiesto cómo con la utilización de la herramienta de diamante policristalino se origina una fuerza de corte menor y, por ende, se tienen valores más bajos de la fuerza específica de corte.



a)



b)

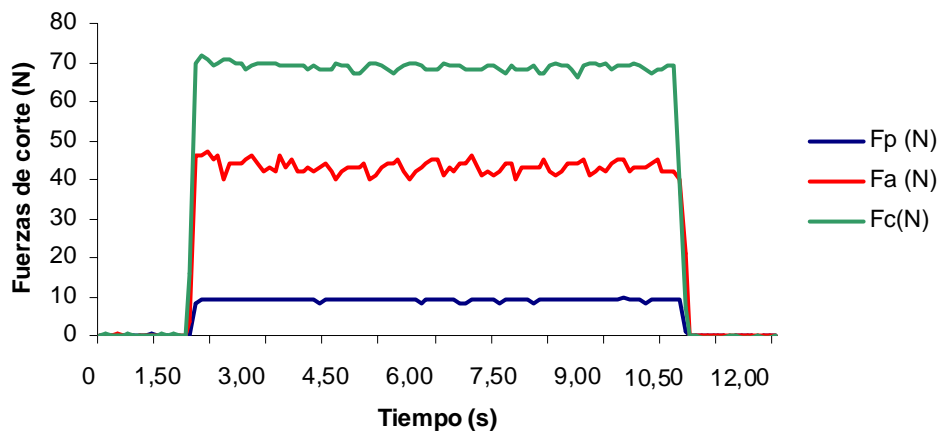
Figura 6.5 - Variación de la fuerza específica de corte en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P= 2$  mm: a) PCD, b) K10



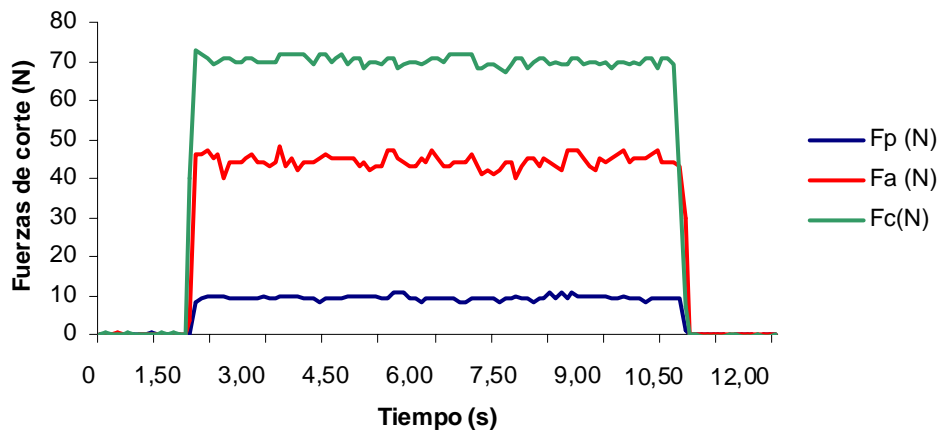
### 6.3.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

En el Anexo C se presentan los resultados de las tres componentes de las fuerzas de corte medidas (Tablas C.5 y C.6), así como los valores calculados de la fuerza de mecanizado, potencia de corte y fuerza específica de corte (Tablas C.7 y C.8) para cada uno de los ensayos realizados.

A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 6.6 la evolución con el tiempo de las tres componentes de las fuerzas de corte para el material PEEK CF30, bajo unas condiciones de corte particulares ( $V_c = 100$  m/min,  $V_a = 0.1$  mm/rev) y para los dos tipos de herramienta (PCD y K10).



a)



b)

Figura 6.6 – Ejemplo de evolución de las fuerzas de corte para PEEK CF30:

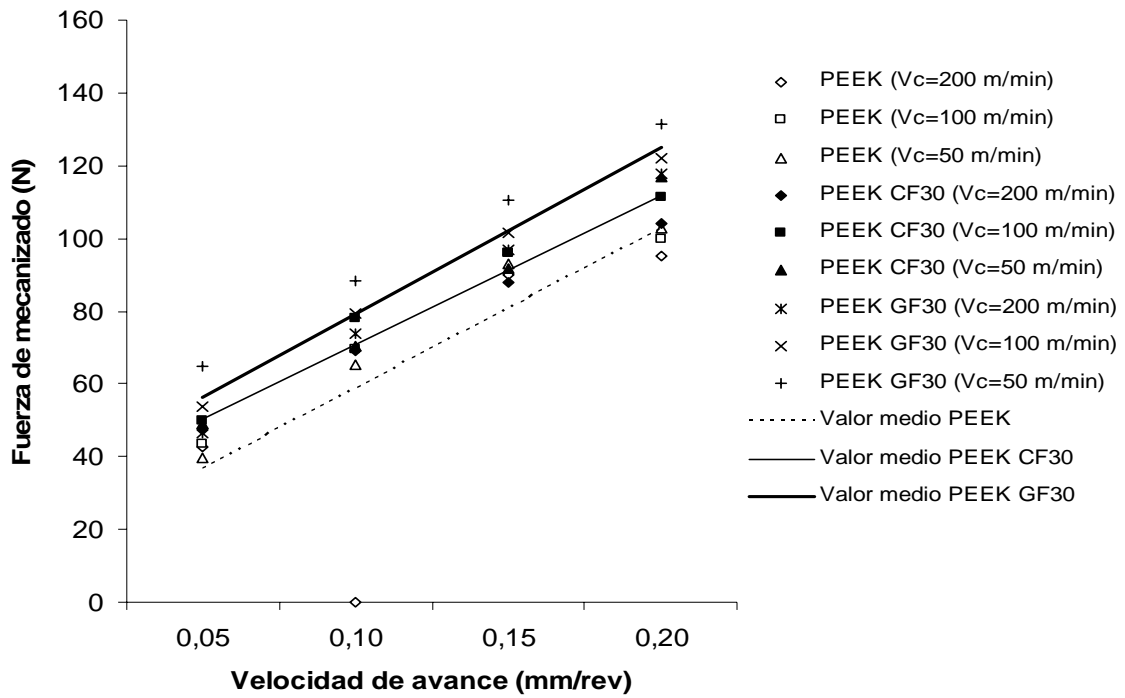
a) PCD, b) K10

Los resultados de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  para las tres poli (éter-éter-cetonas) fueron presentados en 2005 en el VI Congreso nacional de materiales compuestos, celebrado en Valencia (España) (Mata y Davim, 2005-a).

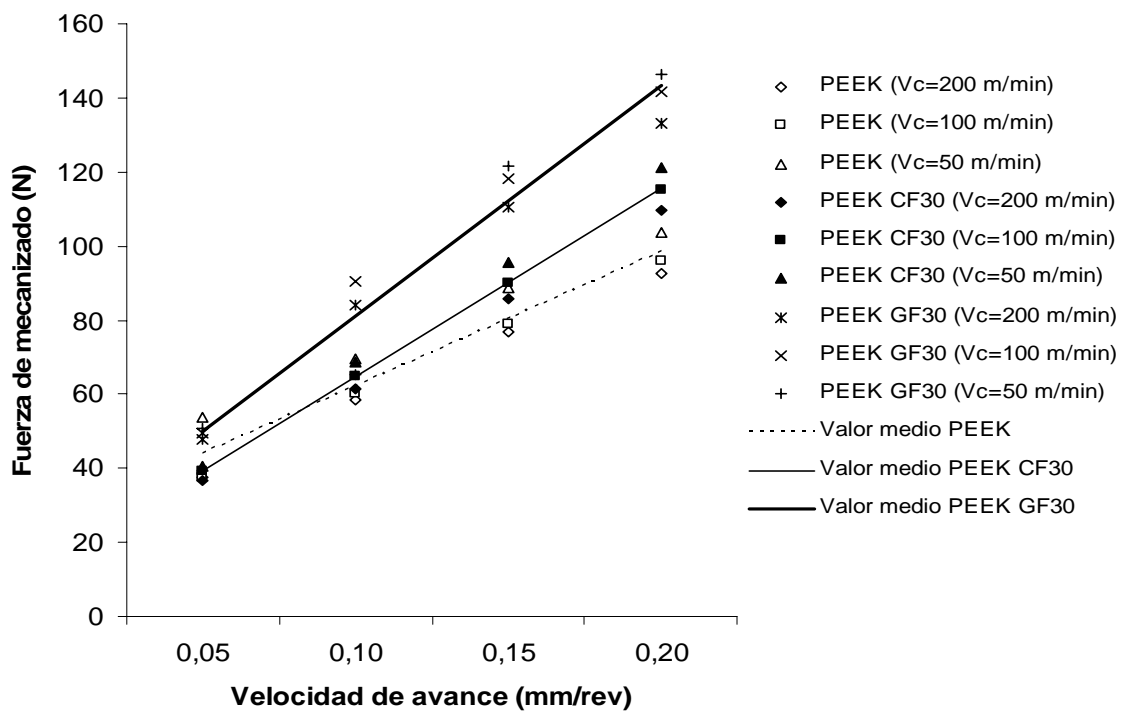
La Figura 6.7 muestra la evolución de la fuerza de mecanizado en función de las condiciones de corte (velocidad de avance y velocidad de corte) y del tipo de material (PEEK, PEEK CF30, PEEK GF30), para los dos tipos de herramienta utilizados. Como se puede apreciar, la fuerza de mecanizado aumenta al aumentar la velocidad de avance y al disminuir la velocidad de corte, siendo el efecto de la velocidad de avance más significativo en todos los casos. Se aprecia cómo es el material PEEK GF30, reforzado con fibras de vidrio, el que presenta valores mayores de la fuerza de mecanizado. Por otra parte, se obtienen valores inferiores de la fuerza de mecanizado trabajando con la herramienta PCD.

La Figura 6.8 muestra la evolución de la potencia de corte en función de los parámetros de corte (velocidad de avance y velocidad de corte) y del tipo de material (PEEK, PEEK CF30, PEEK GF30), para los dos tipos de herramienta utilizados. Como se puede observar, la potencia de corte aumenta al incrementar tanto la velocidad de avance como la velocidad de corte. Por otro lado, el efecto de las fibras de refuerzo se manifiesta en valores mayores de la potencia de corte en todos los casos. Es importante hacer notar que el consumo de potencia es mayor en el caso del material PEEK GF30, reforzado con fibras de vidrio, en comparación con el PEEK CF30, reforzado con fibras de carbono. Se pone también de manifiesto cómo la utilización de la herramienta de diamante policristalino requiere de un consumo de potencia menor, lo que se traduce directamente en un menor consumo de energía. Por lo demás, la variación de la potencia de corte frente a los parámetros funcionales de corte es similar en los dos casos.

La Figura 6.9 muestra la evolución de la fuerza específica de corte en función de los parámetros de corte (velocidad de avance y velocidad de corte) y del tipo de material (PEEK, CF30, GF30), para los dos tipos de herramienta utilizados.

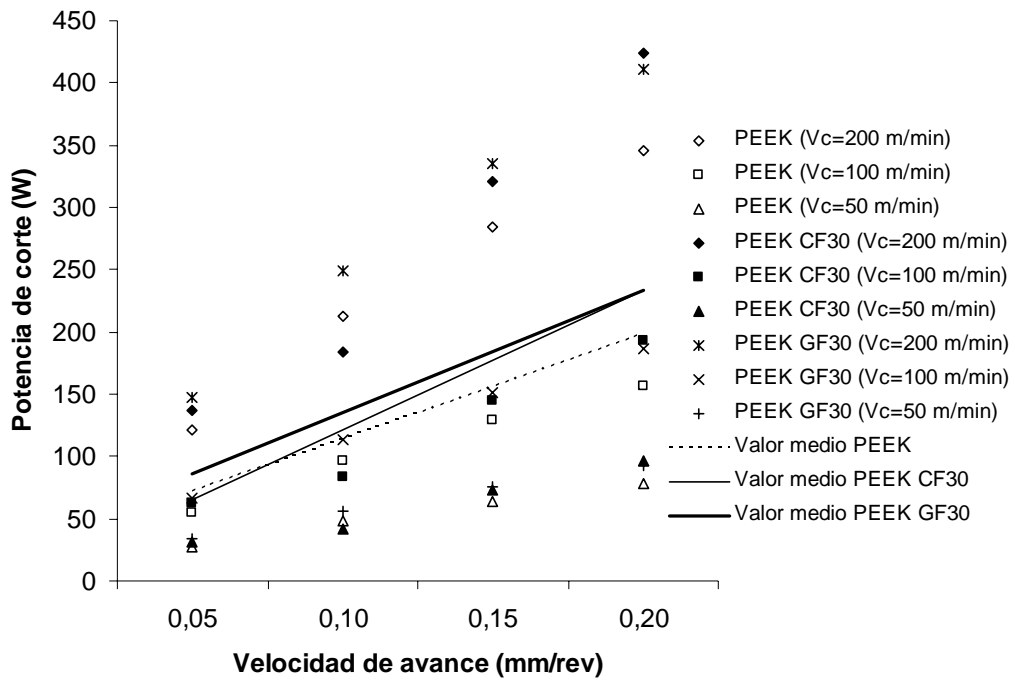


a)

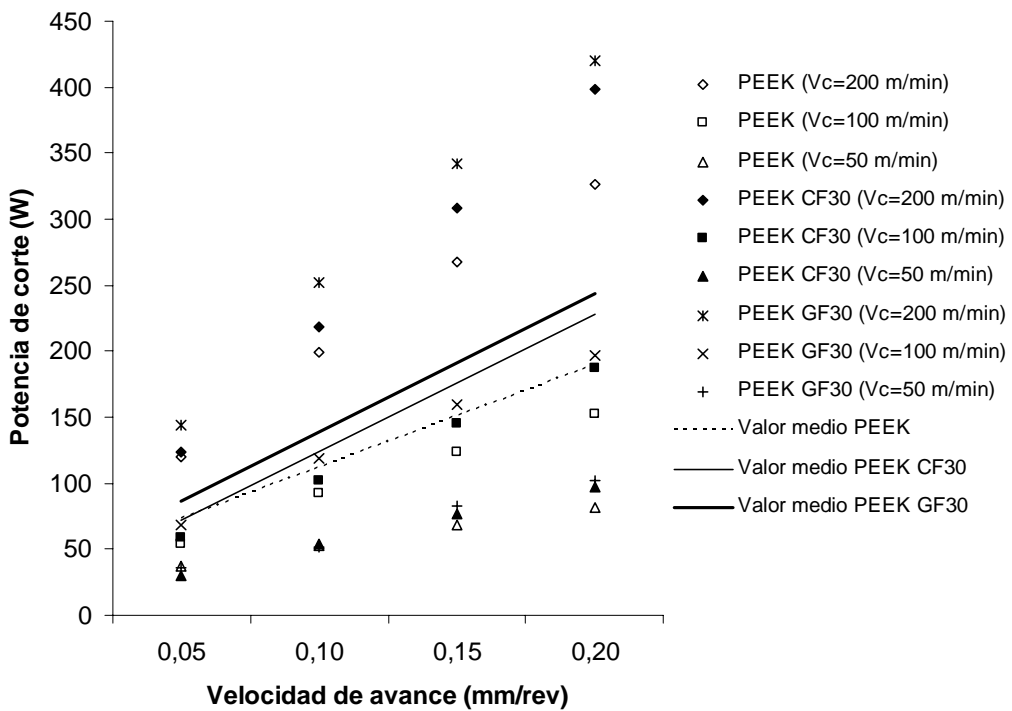


b)

Figura 6.7 - Variación de la fuerza de mecanizado en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10

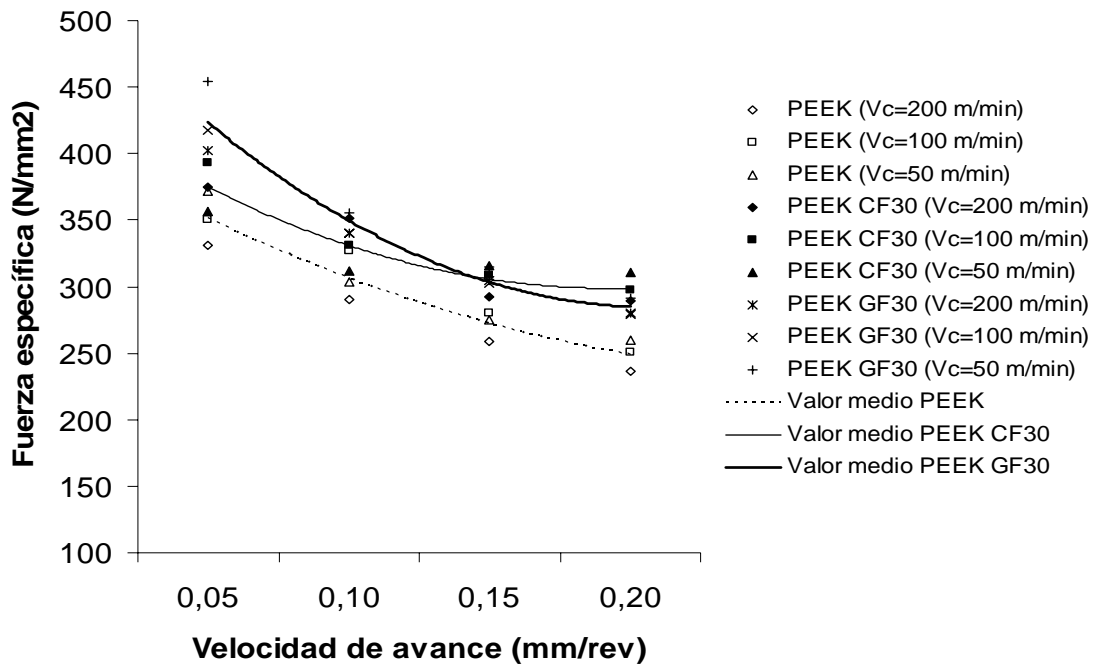


a)

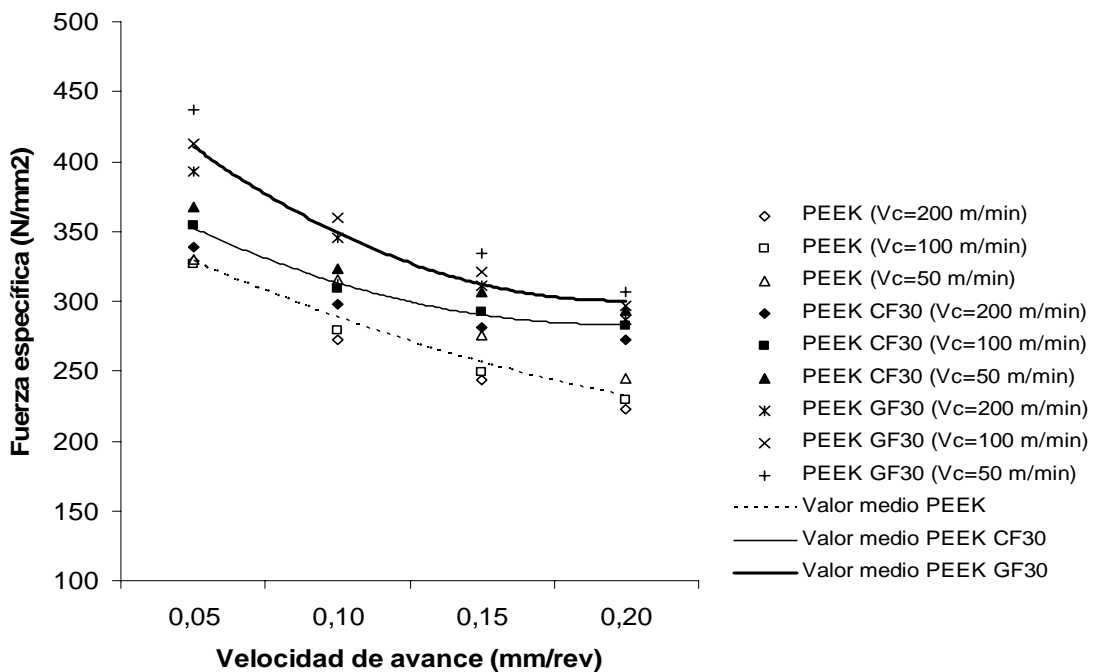


b)

Figura 6.8 - Variación de la potencia de corte en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P = 2$  mm: a) PCD, b) K10



a)



b)

Figura 6.9 - Variación de la fuerza específica de corte en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P= 2$  mm: a) PCD, b) K10

Como se puede observar en la Figura 6.9, la fuerza específica de corte disminuye al aumentar tanto la velocidad de avance como la velocidad de corte, si bien el efecto de esta última es mucho menos significativo.

El efecto de las fibras se traduce en un incremento notable de la fuerza específica de corte, lo cual viene a remarcar la peor maquinabilidad de los materiales reforzados, como era de esperar. Se obtienen valores más elevados de este parámetro para el PEEK GF30, reforzado con fibras de vidrio, en comparación con el PEEK CF30, reforzado con fibras de carbono, igual que ocurría con la fuerza de mecanizado y la potencia de corte.

Se pone también de manifiesto cómo con la utilización de la herramienta de diamante policristalino se origina una fuerza de corte menor y, por ende, se tienen valores más bajos de la fuerza específica de corte.

#### **6.4. Acabado superficial**

A continuación, se van a analizar los resultados de rugosidad, en particular de la rugosidad media (Ra) (ISO 4287/1), que es el parámetro más utilizado para controlar la calidad superficial de los productos mecanizados, y de la rugosidad máxima (Rt) (ISO 4287/1), que es sensible a las grandes desviaciones sobre la línea media del perfil. El significado físico y funcional de estos parámetros de rugosidad fue comentado en el Capítulo 2.

Se analizará la evolución de la rugosidad con los parámetros funcionales de corte (velocidad de corte y velocidad de avance) y el tipo de herramienta (PCD y K10), para los dos grupos de materiales estudiados (Poliamidas y PEEK).

Finalmente, se estudiará la precisión dimensional (IT), obtenida a partir de la expresión enunciada en el Capítulo 3, para cada material, herramienta y condiciones de corte.

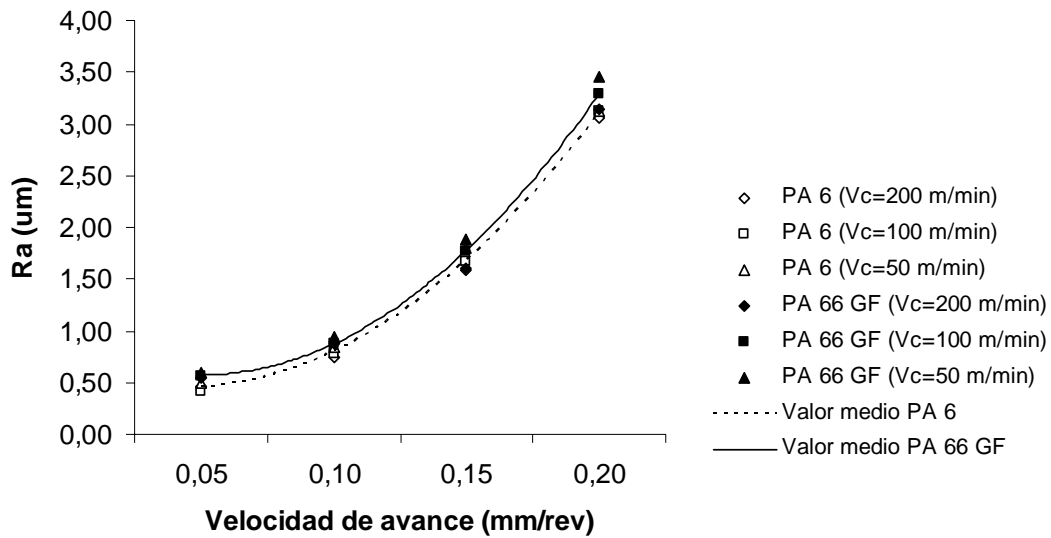
##### **6.4.1. Poliamidas**

Los resultados de Ra y Rt para las dos poliamidas fueron presentados en 2006 en el IX Congreso Nacional de materiales, celebrado en Vigo (España) (*Mata y Davim, 2006*).

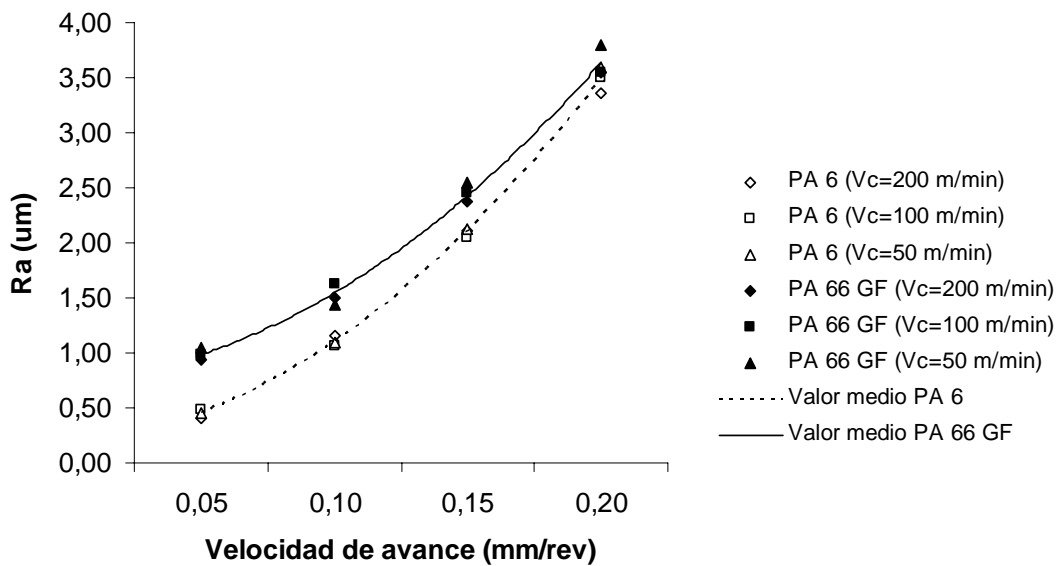
La relación completa de valores de Ra y Rt puede consultarse en las Tablas C.9 y C.10 del Anexo C.

La Figura 6.10 muestra la evolución de Ra en función de los parámetros de corte para los dos tipos de herramientas utilizados en los ensayos. Queda de manifiesto cómo para el material reforzado (PA 66-GF30) se obtienen valores mayores de rugosidad, circunstancia

más palpable para el caso de la herramienta K10. La rugosidad aumenta significativamente al aumentar la velocidad de avance y disminuye ligeramente con la velocidad de corte. Por otra parte, la herramienta PCD permite obtener valores de rugosidad más bajos y, en consecuencia, un mejor acabado superficial.



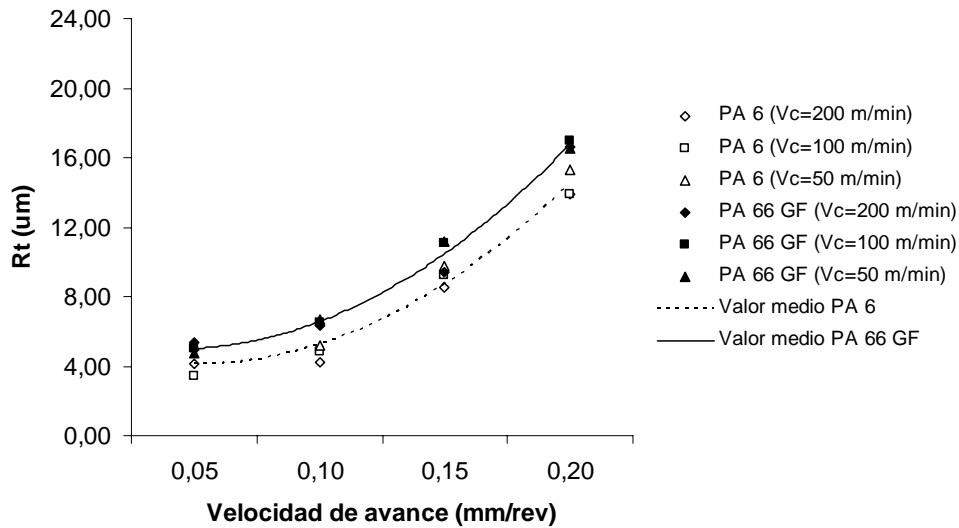
a)



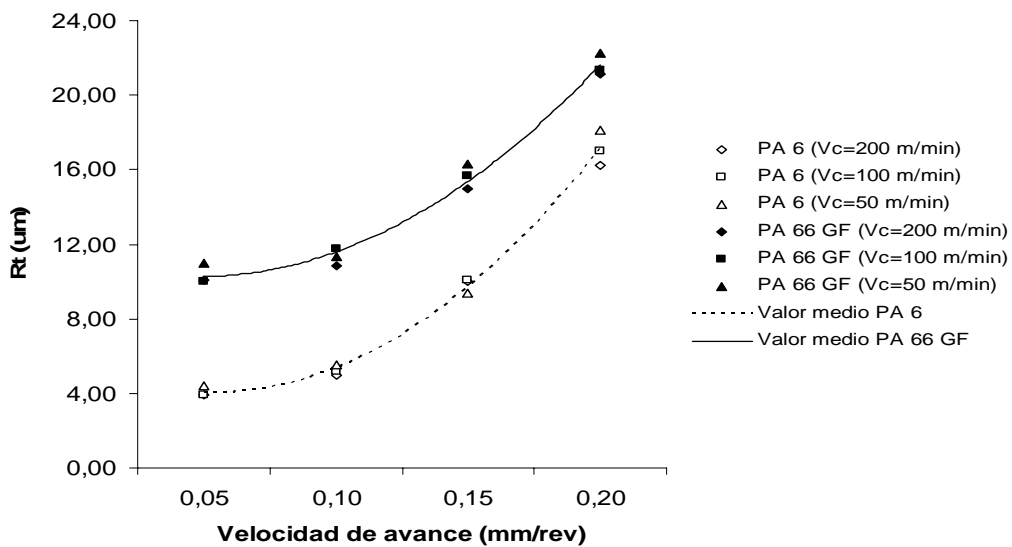
b)

Figura 6.10 - Evolución de Ra en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2\text{ mm}$ : a) PCD, b) K10.

La Figura 6.11 muestra la evolución de  $R_t$  en función de los parámetros de corte para los dos tipos de herramientas utilizados en los ensayos. Se pueden realizar comentarios similares a lo especificado para el caso de  $R_a$ , tanto en lo que respecta a la herramienta de corte, variación de  $R_t$  con los parámetros funcionales de corte e influencia de las fibras de refuerzo.



a)



b)

Figura 6.11 - Evolución de  $R_t$  en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2\text{ mm}$ : a) PCD, b) K10.



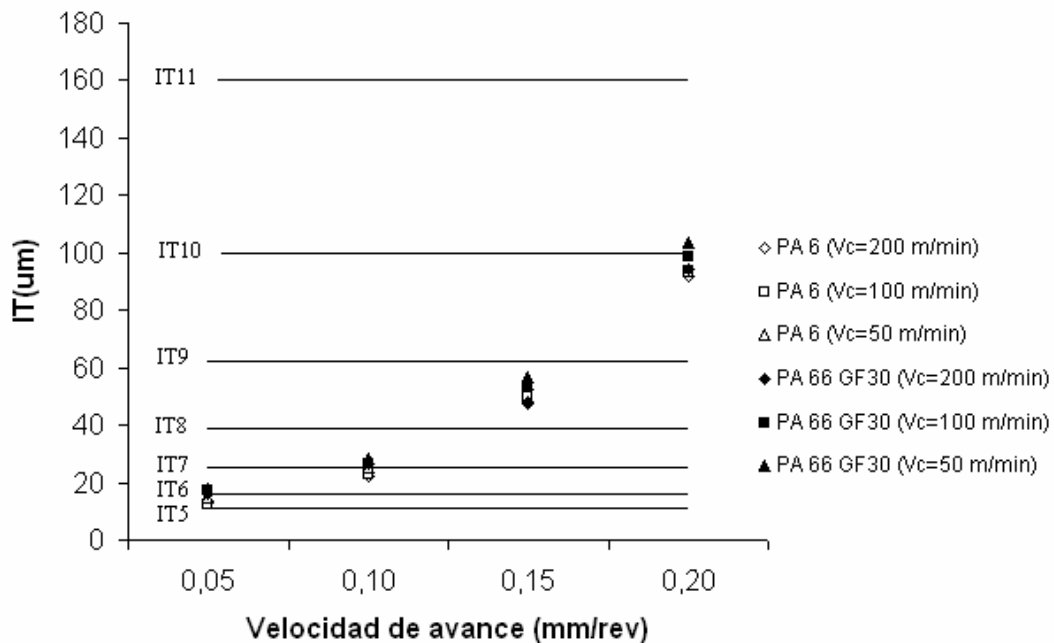
En las Tablas C.9 a C.10 (véase Anexo C) se presentan los valores del resto de parámetros de rugosidad medidos ( $R_p$ ,  $R_q$ ) en función de las condiciones de corte para cada una de las herramientas utilizadas y materiales ensayados. Como se puede verificar, la dependencia con la velocidad de avance y la velocidad de corte es similar a los casos estudiados ( $R_a$  y  $R_t$ ). Se pueden efectuar también análogos comentarios sobre las herramientas y materiales. La Tabla 6.1 muestra la precisión dimensional (IT), obtenida a partir de la expresión enunciada en el Capítulo 3 (Ec. 3.4), para cada material, herramienta y condiciones de corte.

Tabla 6.1 – Valor de la precisión dimensional (IT): Poliamidas

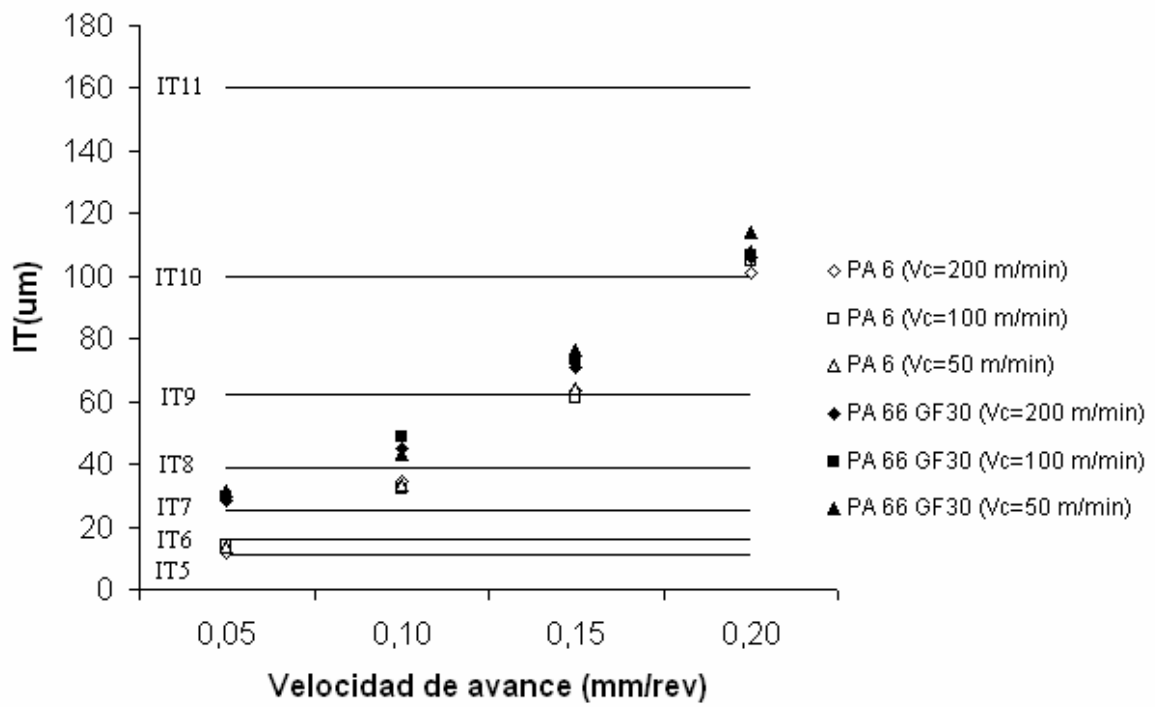
Ensayo	Herramienta	POLIAMIDA	
		PA 6	PA 66 GF30
1	PCD	IT5	IT6
	K10	IT5	IT7
2	PCD	IT6	IT7
	K10	IT7	IT8
3	PCD	IT8	IT8
	K10	IT9	IT9
4	PCD	IT9	IT9
	K10	IT10	IT10
5	PCD	IT5	IT6
	K10	IT5	IT7
6	PCD	IT6	IT7
	K10	IT7	IT8
7	PCD	IT8	IT8
	K10	IT8	IT9
8	PCD	IT9	IT9
	K10	IT10	IT10
9	PCD	IT5	IT6
	K10	IT5	IT7
10	PCD	IT7	IT7
	K10	IT7	IT8
11	PCD	IT8	IT8
	K10	IT9	IT9
12	PCD	IT9	IT10
	K10	IT10	IT10

Si se observa la Tabla 6.1, se comprueba como siempre se obtienen valores mayores de IT para el material reforzado (PA 66-GF30). La presencia de las fibras de vidrio conduce a un empeoramiento de la precisión dimensional. Por otro lado, se evidencia también cómo la herramienta PCD siempre permite obtener mayores calidades, en comparación con la herramienta K10. Para el avance más bajo ( $V_a = 0.05$  mm/rev) las dos herramientas conducen a un comportamiento similar. Trabajando con velocidades de avance bajas en los dos materiales se pueden conseguir calidades utilizadas en la construcción mecánica cuidada (IT7 e IT8) e incluso en la construcción de gran precisión (IT5 e IT6). Para velocidades de avance más elevadas ( $V_a = 0.15$  mm/rev y  $V_a = 0.2$  mm/rev) se obtienen calidades aptas para construcción mecánica corriente (IT9 e IT10). Por lo demás, el efecto de la velocidad de corte se puede considerar irrelevante.

La Figura 6.12 muestra la posición de los resultados obtenidos con relación a valores de precisión dimensional estándar.



a)



b)

Figura 6.12 – Representación de la precisión dimensional en las poliamidas:

a) PCD, b) K10

#### 6.4.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

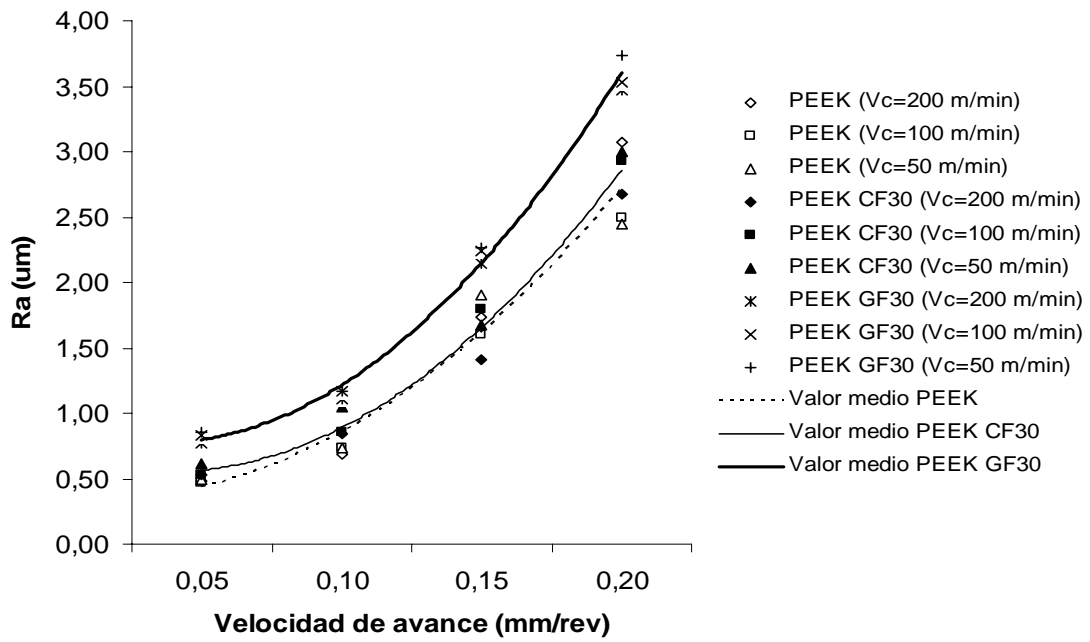
Los resultados de  $R_a$  y  $R_t$  para las tres poli (éter-éter-cetonas) fueron presentados en 2005 en el VI Congreso nacional de materiales compuestos, celebrado en Valencia (España) (Mata y Davim, 2005-a).

La relación completa de valores de  $R_a$  y  $R_t$  puede consultarse en las Tablas C.11 y C.12 del Anexo C.

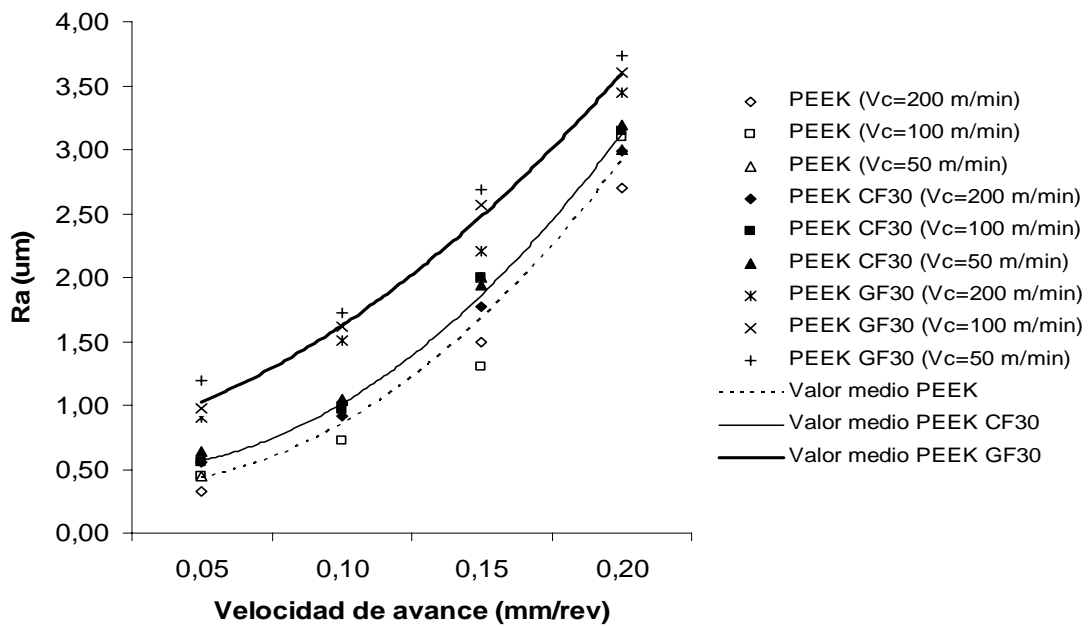
La Figura 6.13 muestra la evolución de  $R_a$  en función de los parámetros de corte para los dos tipos de herramientas utilizados en los ensayos. Como se puede observar, es el PEEK GF30, reforzado con fibras de vidrio, el material con el que se obtiene un peor acabado superficial. Si bien, el PEEK CF30, reforzado con fibras de carbono, presenta valores ligeramente mayores en relación con el PEEK, en realidad se trata de acabados superficiales muy similares, especialmente cuando el mecanizado es con la herramienta de diamante policristalino, PCD. La rugosidad aumenta significativamente al aumentar la velocidad de avance y disminuye ligeramente con la velocidad de corte. Por otra parte, la herramienta PCD permite obtener valores de rugosidad más bajos y, en consecuencia, un mejor acabado superficial, para los tres materiales ensayados.

La Figura 6.14 muestra la evolución de  $R_t$  en función de los parámetros de corte para los dos tipos de herramientas utilizados en los ensayos. Se pueden realizar comentarios similares a lo especificado para el caso de  $R_a$ , tanto en lo que respecta a la herramienta de corte, variación de  $R_t$  con los parámetros funcionales de corte e influencia de las fibras de refuerzo.

En las Tablas C.11 a C.12 (véase Anexo C) se presentan los valores del resto de parámetros de rugosidad medidos ( $R_p$ ,  $R_q$ ) en función de las condiciones de corte para cada una de las herramientas utilizadas y materiales ensayados. Como se puede verificar, la dependencia con la velocidad de avance y la velocidad de corte es similar a los casos estudiados ( $R_a$  y  $R_t$ ). Se pueden efectuar también análogos comentarios sobre las herramientas y materiales.

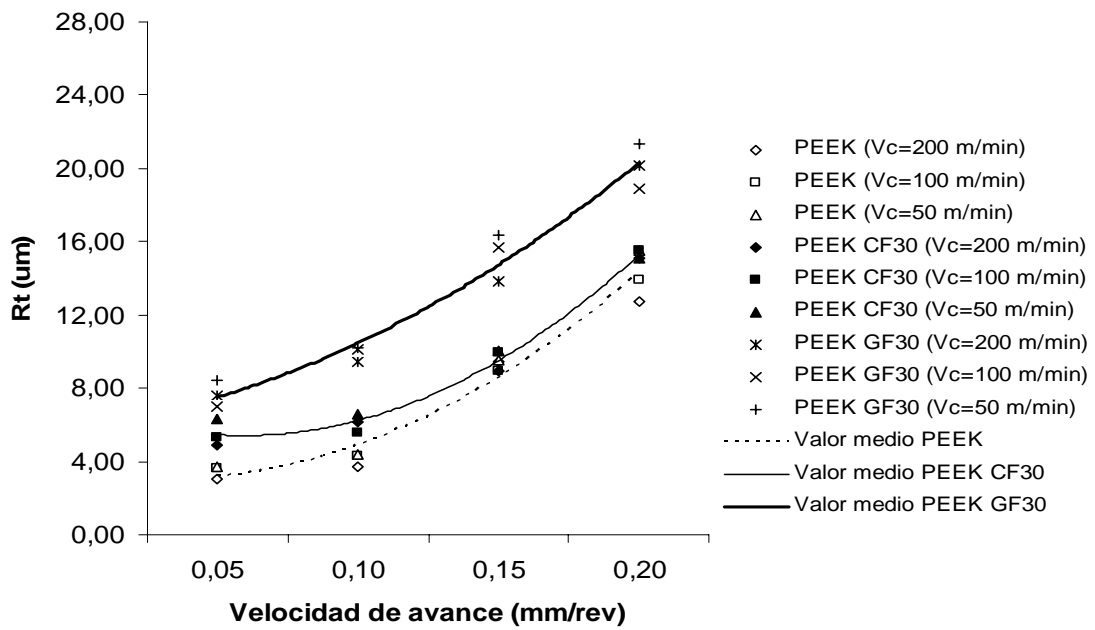


a)

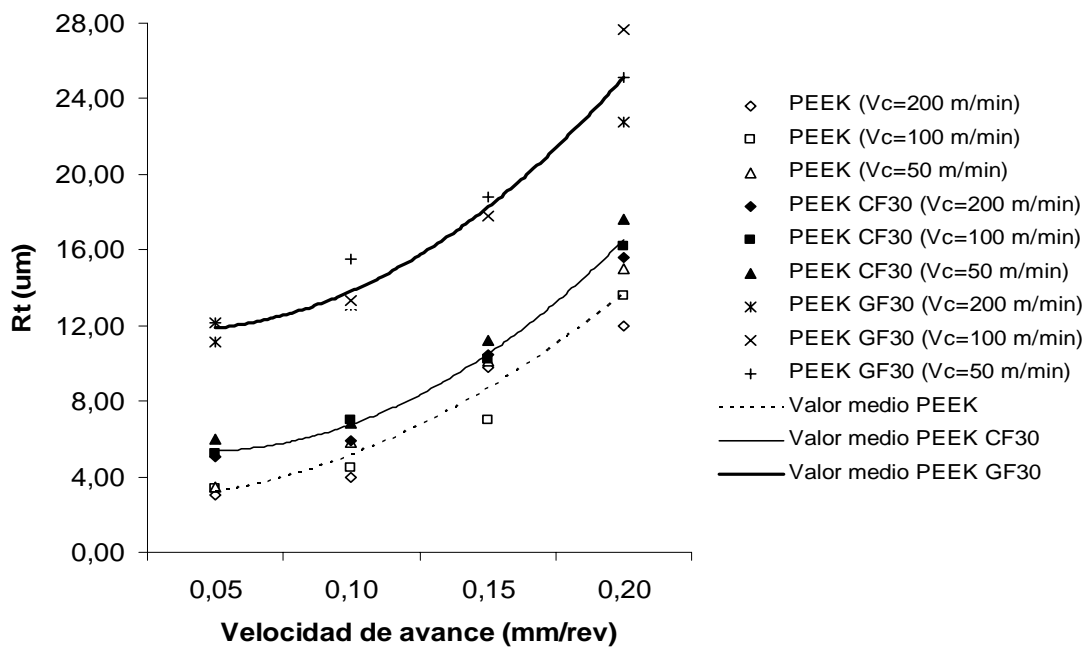


b)

Figura 6.13 - Evolución de Ra en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2\text{ mm}$ : a) PCD, b) K10.



a)



b)

Figura 6.14 - Evolución de  $R_t$  en función de las velocidades de corte y avance para profundidad de pasada constante,  $P=2$  mm: a) PCD, b) K10.

La Tabla 6.2 muestra la precisión dimensional (IT), obtenida a partir de la expresión enunciada en el Capítulo 3, para cada material, herramienta y condiciones de corte.

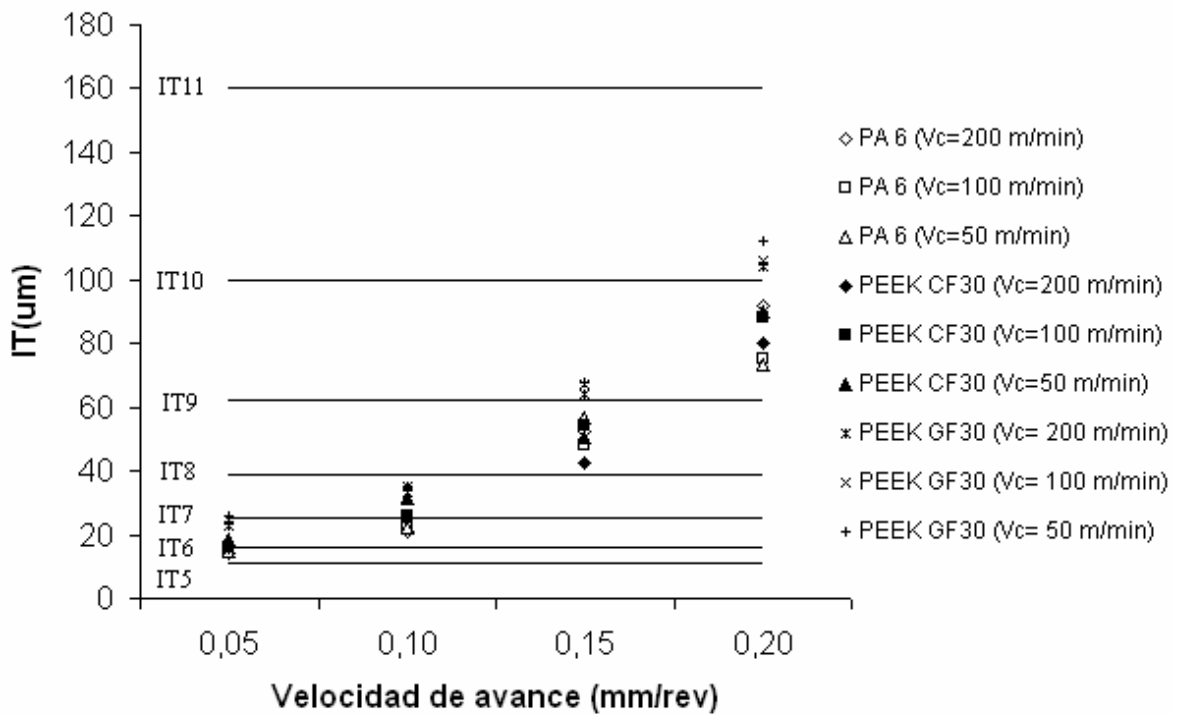
Tabla 6.2 – Valor de la precisión dimensional (IT): Poli (éter-éter-cetonas)

Ensayo	Herramienta	PEEK		
		PEEK	PEEK CF30	PEEK GF30
1	PCD	IT4	IT5	IT6
	K10	IT5	IT6	IT7
2	PCD	IT6	IT7	IT7
	K10	IT7	IT7	IT8
3	PCD	IT8	IT8	IT9
	K10	IT8	IT9	IT9
4	PCD	IT9	IT9	IT10
	K10	IT9	IT10	IT10
5	PCD	IT5	IT6	IT7
	K10	IT5	IT6	IT7
6	PCD	IT6	IT7	IT7
	K10	IT6	IT7	IT8
7	PCD	IT8	IT8	IT9
	K10	IT8	IT9	IT9
8	PCD	IT9	IT9	IT10
	K10	IT9	IT10	IT10
9	PCD	IT5	IT6	IT7
	K10	IT5	IT6	IT7
10	PCD	IT6	IT7	IT7
	K10	IT7	IT7	IT8
11	PCD	IT8	IT8	IT9
	K10	IT8	IT8	IT9
12	PCD	IT9	IT9	IT10
	K10	IT9	IT9	IT10

Observando la Tabla 6.2 se comprueba como siempre se obtienen valores mayores de IT (peor calidad) para el material reforzado con fibras de vidrio (PEEK GF30), en comparación con el PEEK no reforzado y con el PEEK CF30 reforzado con fibras de carbono. Con el PEEK CF30, a pesar de la presencia de las fibras de refuerzo, se pueden conseguir precisiones dimensionales comparables o ligeramente peores que con el PEEK. Por otro lado, se evidencia también cómo la herramienta PCD permite obtener mayores calidades (valores más bajos de IT), en comparación con la herramienta K10, aunque la diferencia es menos significativa que en el caso de las poliamidas. Trabajando con velocidades de avance bajas en los dos materiales se pueden conseguir calidades utilizadas

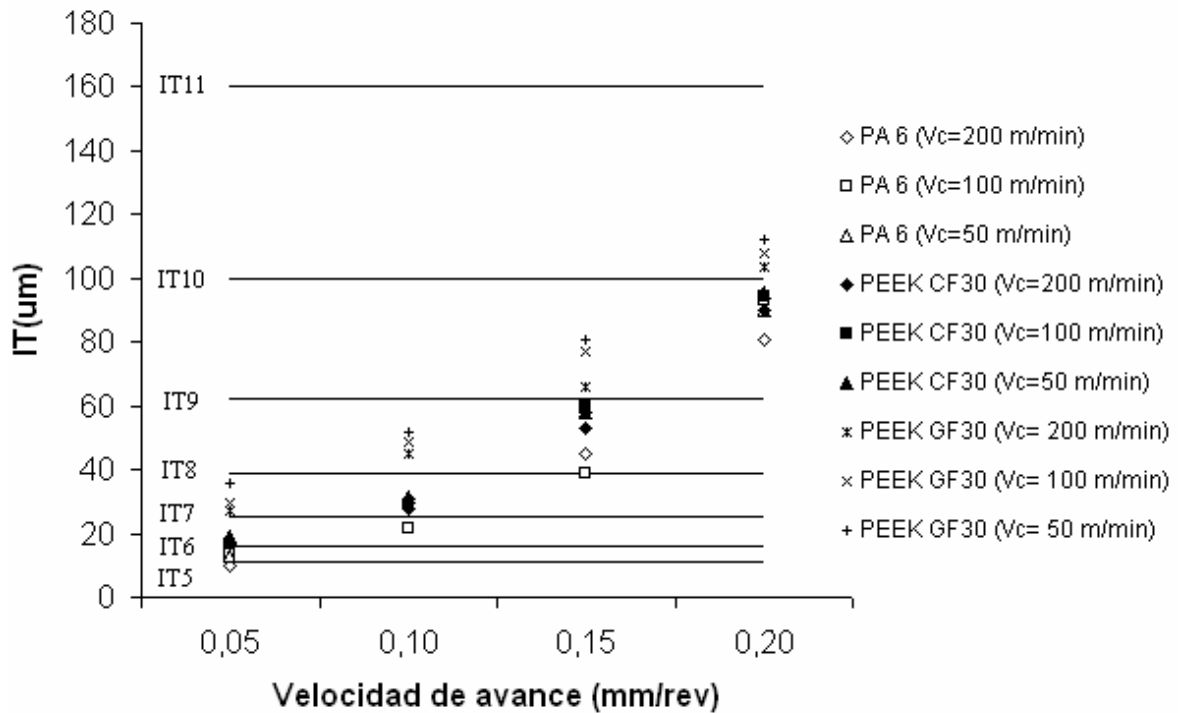
en la construcción mecánica cuidada (IT7 e IT8) e incluso en la construcción de gran precisión (IT5 e IT6), especialmente para  $V_a = 0.05$  mm/rev en los tres materiales y también  $V_a = 0.10$  mm/rev en el caso del material no reforzado. Para velocidades de avance más elevadas ( $V_a = 0.15$  mm/rev y  $V_a = 0.20$  mm/rev) se obtienen calidades aptas para construcción mecánica corriente (IT9 e IT10). En el caso del material no reforzado (PEEK) se obtienen casos de IT9 e IT10 sólo para  $V_a = 0.20$  mm/rev. Por lo demás, el efecto de la velocidad de corte se puede considerar irrelevante.

La Figura 6.15 muestra la posición de los resultados obtenidos con relación a valores de precisión dimensional estándar.



a)





b)

Figura 6.15 – Representación de la precisión dimensional en poli (éter-éter-cetonas): a) PCD, b) K10

### 6.5. Efecto de la profundidad de pasada

Se evaluará en lo sucesivo el efecto de la profundidad de pasada sobre los diferentes parámetros considerados en este Capítulo, con el fin de conocer su influencia sobre la maquinabilidad de estos dos grupos de materiales.

Para ello, se realizaron ensayos con 4 valores diferentes de profundidad de corte y se presentan los resultados para una velocidad de corte constante de  $V_c = 100$  m/min y una velocidad de avance constante de  $V_a = 0.10$  mm/rev (de acuerdo con la Tabla 3.3). La serie específica de ensayos para verificar este efecto se realizó tanto con la herramienta PCD como con la K10.

Se demostrará que los mejores resultados, en términos de fuerzas de corte y acabado superficial, se consiguen para la profundidad de corte más baja ( $P = 0.50$  mm). Es preciso recordar que la elección de una profundidad de pasada de  $P = 2$  mm para la serie principal de ensayos obedece a la necesidad de obtener virutas de ciertas dimensiones para poder

evaluar algunos parámetros fundamentales y definir el modelo físico de corte, tal y como se expresó en el Capítulo 4.

Finalmente, indicar que en el caso de las poli (éter-éter-cetonas) (PEEK) sólo se presentarán los resultados para el PEEK no reforzado y para el PEEK CF30, reforzado con fibras de carbono. No obstante, sobre la base de los resultados anteriores, se pueden anticipar mayores valores de fuerzas de corte y de rugosidad en comparación con el PEEK y el PEEK CF30. Es previsible, por lo demás, un efecto similar de la profundidad de pasada al que se evidenciará en el resto de materiales ensayados.

### **6.5.1. Poliamidas**

Estudiaremos el efecto de la profundidad de pasada sobre las fuerzas de corte y el acabado superficial en este grupo de materiales.

#### **6.5.1.1. Fuerza y potencia de corte**

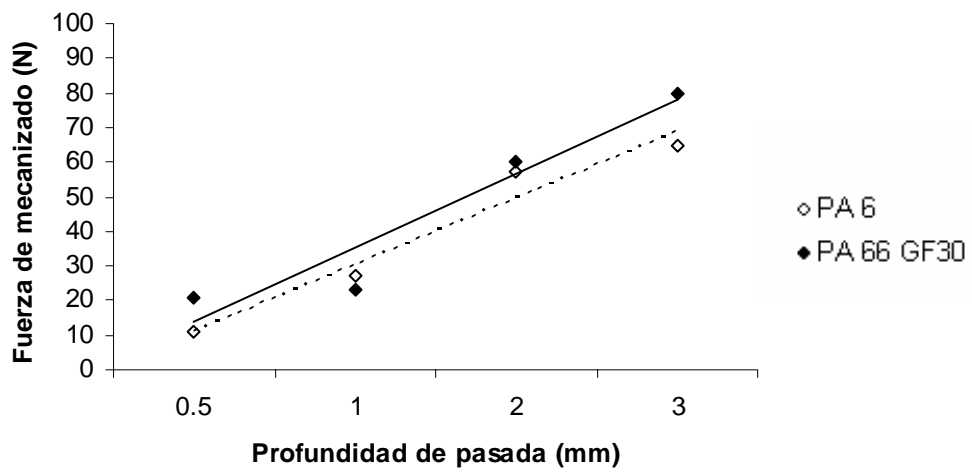
Se analiza en primer lugar el efecto de la profundidad de pasada sobre la fuerza de mecanizado, la potencia de corte y la fuerza específica de corte, para los dos tipos de herramientas, PCD y K10.

La relación completa de valores de  $F_c$ ,  $F_a$ ,  $F_p$  medidos y  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  calculados puede consultarse en las Tablas C.13 y C.14 del Anexo C.

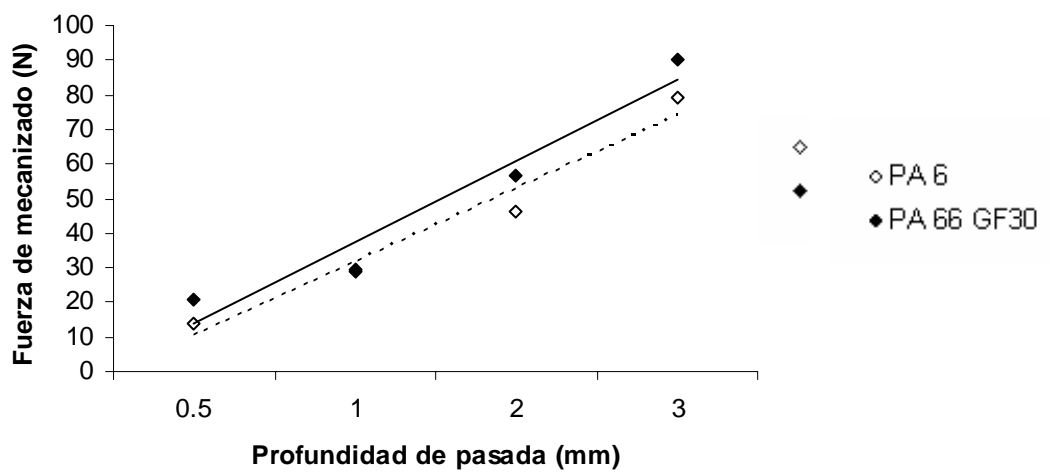
La Figura 6.16 muestra la evolución de la fuerza de mecanizado con la profundidad de pasada para los dos materiales ensayados y los dos tipos de herramientas utilizadas.

Se observa cómo la fuerza de mecanizado aumenta lineal y significativamente con la profundidad de pasada en todos los casos. El efecto del material y de la herramienta es idéntico a lo comentado en el apartado 6.3.

La Figura 6.17 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.



a)



b)

Figura 6.16 - Evolución de la fuerza de mecanizado en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

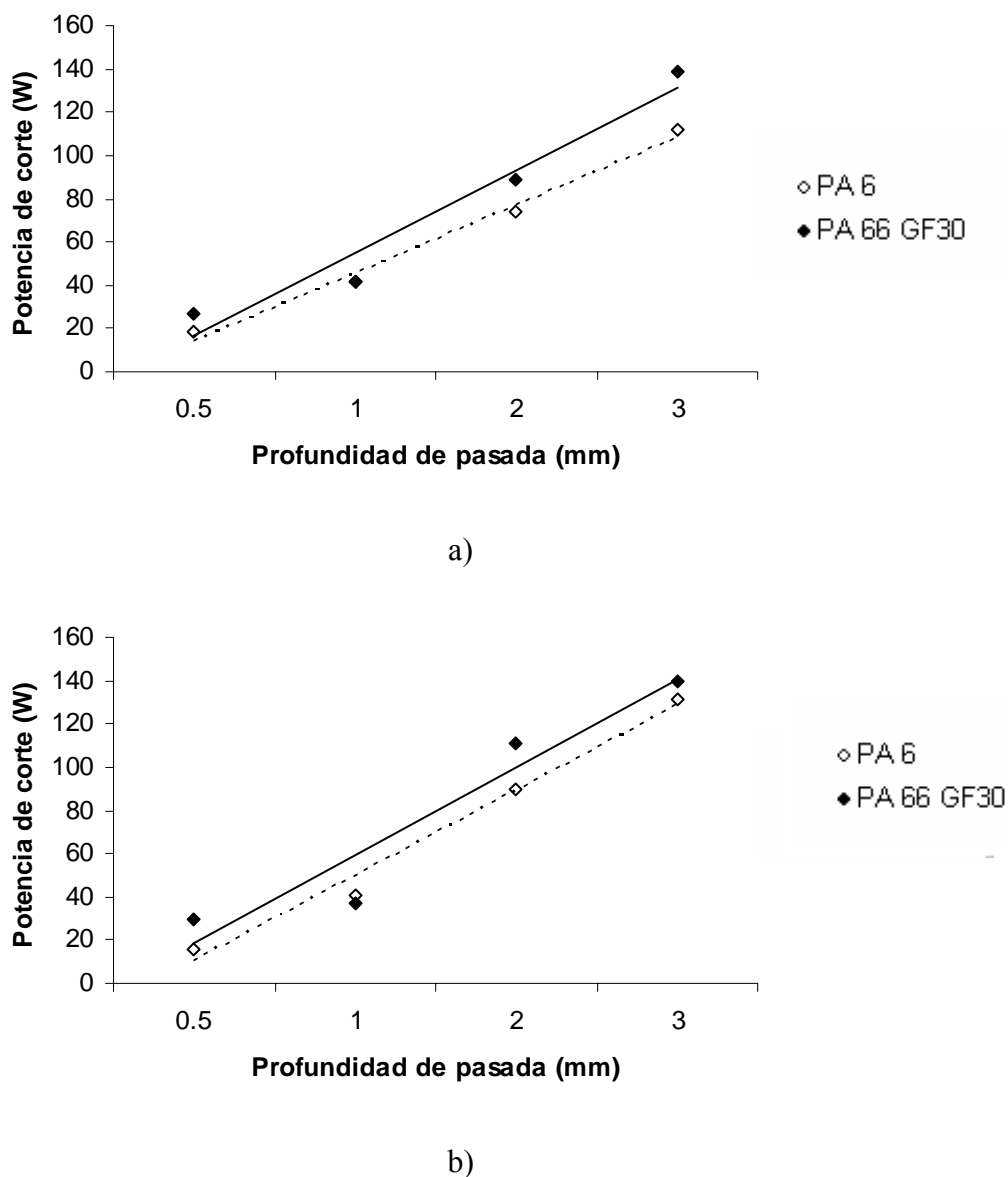
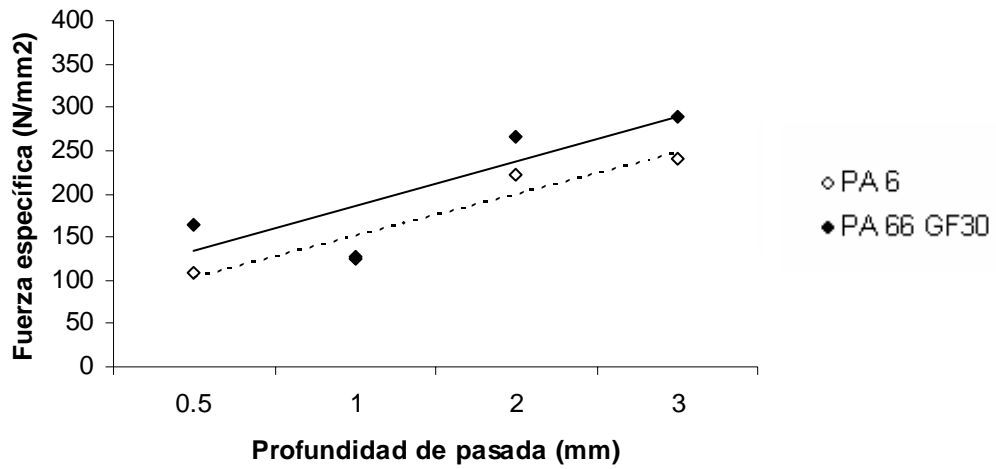


Figura 6.17 - Evolución de la potencia de corte en función de la profundidad de pasada:

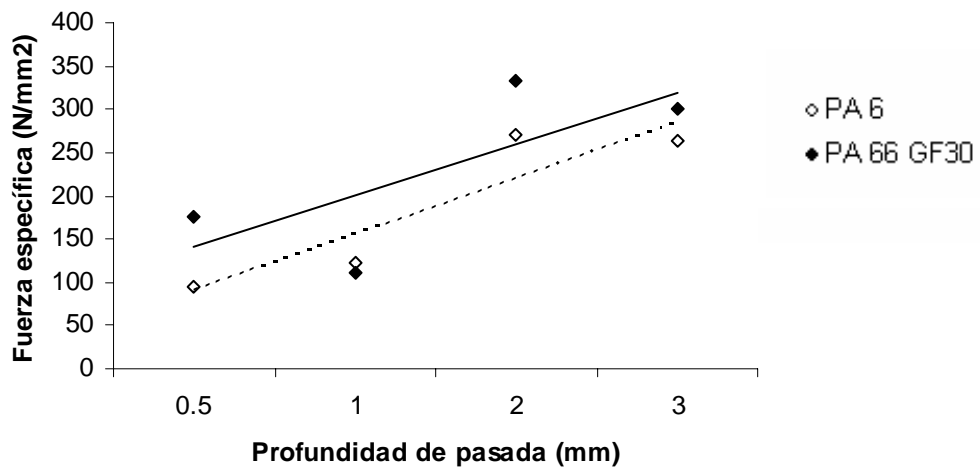
a) PCD, b) K10

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 6.18 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.



a)



b)

Figura 6.18 - Evolución de la fuerza específica de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

La fuerza específica de corte aumenta a medida que aumenta la profundidad de pasada en todos los casos analizados. No obstante, la pendiente de los valores medios es más baja que en los casos que se acaban de comentar, debido a que, de acuerdo con la definición de fuerza específica de corte (Ec. 6.3), a medida que aumenta la profundidad de pasada (en el

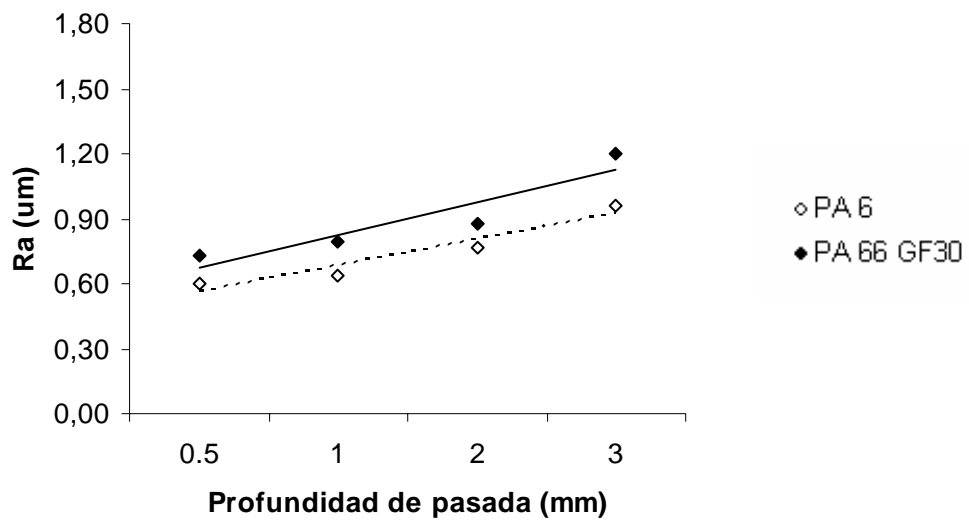
denominador), el valor de  $K_s$  debe descender. Si no se invierte la tendencia es porque prevalece el efecto del aumento de la fuerza de corte con respecto al de la profundidad de pasada en el cociente. Dado que un proceso de mecanizado será tanto más eficiente cuanto menor sea el valor de la fuerza específica de corte, es obvio que, desde este punto de vista, interesa trabajar con profundidades de pasada bajas.

#### **6.5.1.2. Acabado superficial**

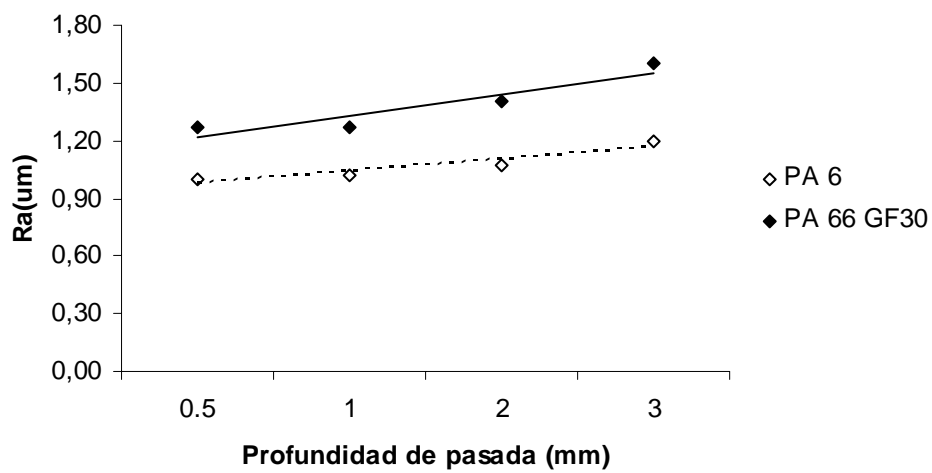
A continuación, se analiza el efecto de la profundidad de pasada sobre el acabado superficial, en particular sobre los parámetros de rugosidad seleccionados,  $R_a$  y  $R_t$ , para los dos tipos de herramientas, PCD y K10 (véase Tabla C.15 del Anexo C).

La Figura 6.19 muestra la evolución de  $R_a$  en función de la profundidad de pasada. Como se puede observar,  $R_a$  aumenta con la profundidad de pasada, apreciándose más el efecto a partir de  $P = 1$  mm. Por lo demás, se evidencia de nuevo, tal y como se verificó en el epígrafe 6.4.2., 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 6.20 muestra la evolución del parámetro de rugosidad  $R_t$  en función de la profundidad de pasada. Se verifica que  $R_t$  aumenta con la profundidad de pasada, si bien el efecto sólo es especialmente significativo al pasar de  $P= 2$  mm a  $P= 3$  mm.

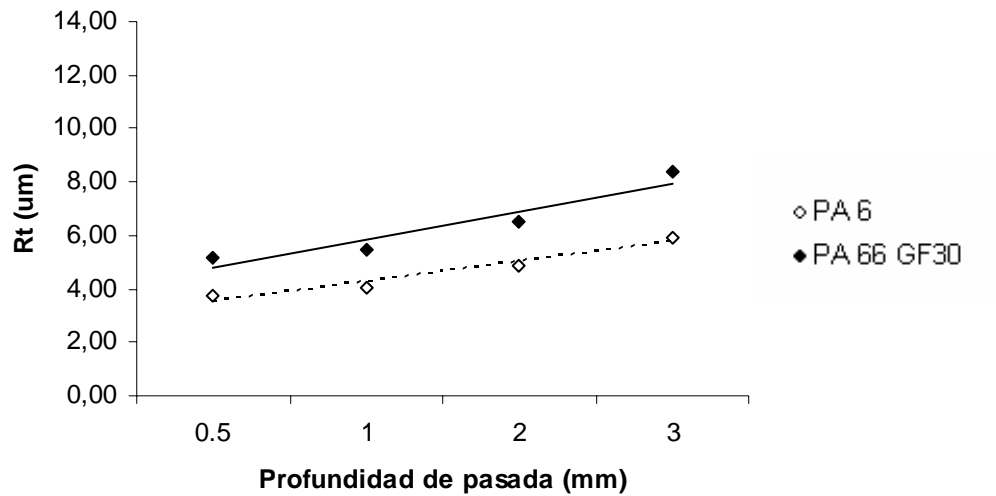


a)

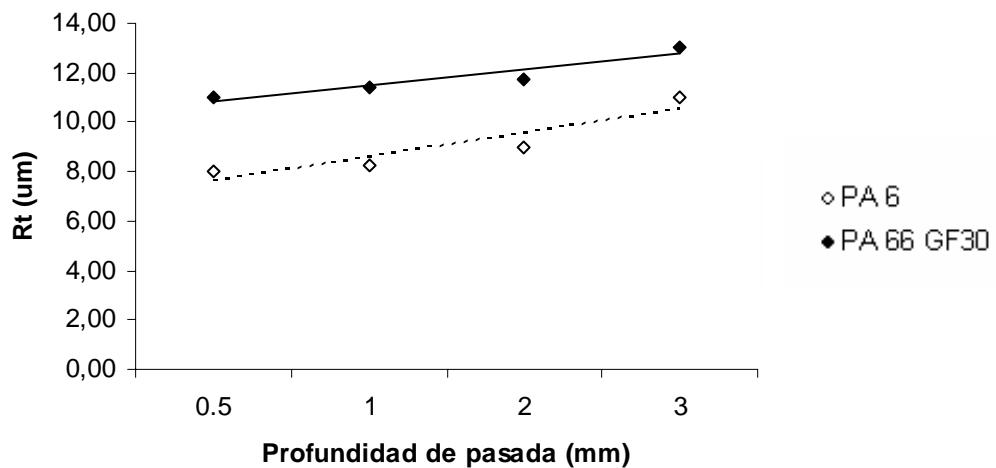


b)

Figura 6.19 - Evolución de Ra en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10



a)



b)

Figura 6.20 - Evolución de Rt en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

### 6.5.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

Estudiaremos el efecto de la profundidad de pasada sobre las fuerzas de corte y el acabado superficial en este grupo de materiales.

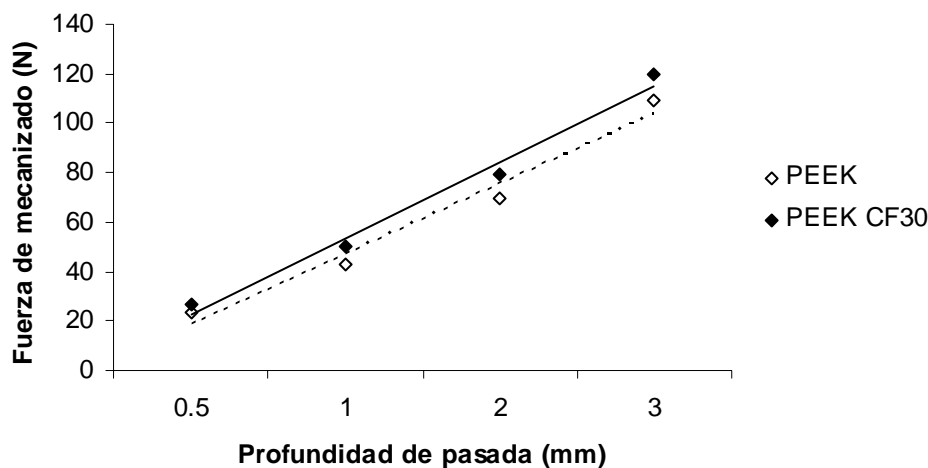
#### 6.5.2.1. Fuerza y potencia de corte

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

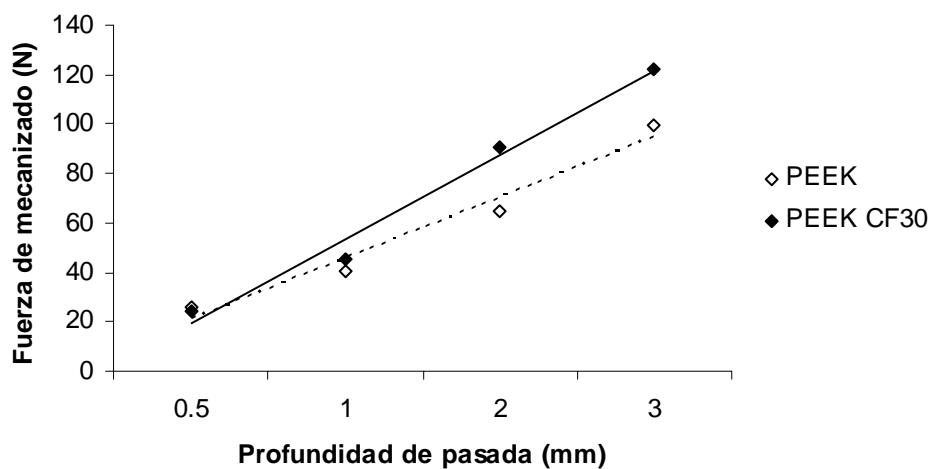


La relación completa de valores de  $F_c$ ,  $F_a$ ,  $F_p$  medidos y  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  calculados puede consultarse en las Tablas C.16 y C.17 del Anexo C.

La Figura 6.21 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.



a)

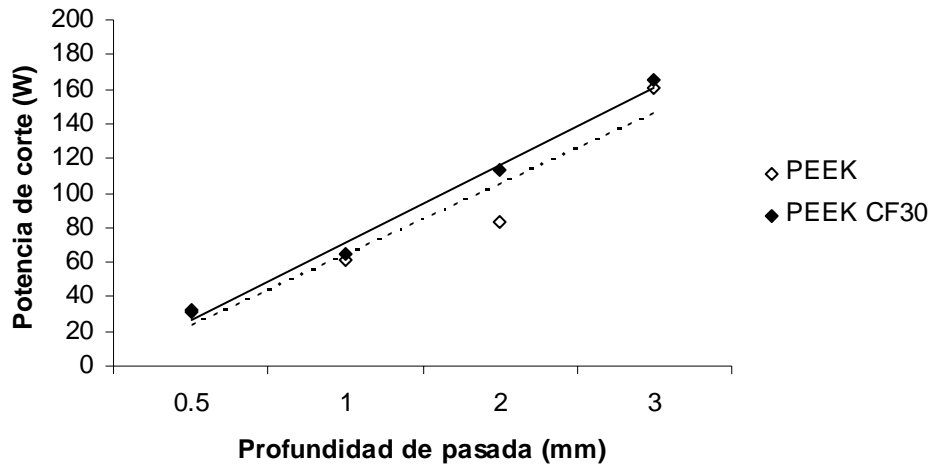


b)

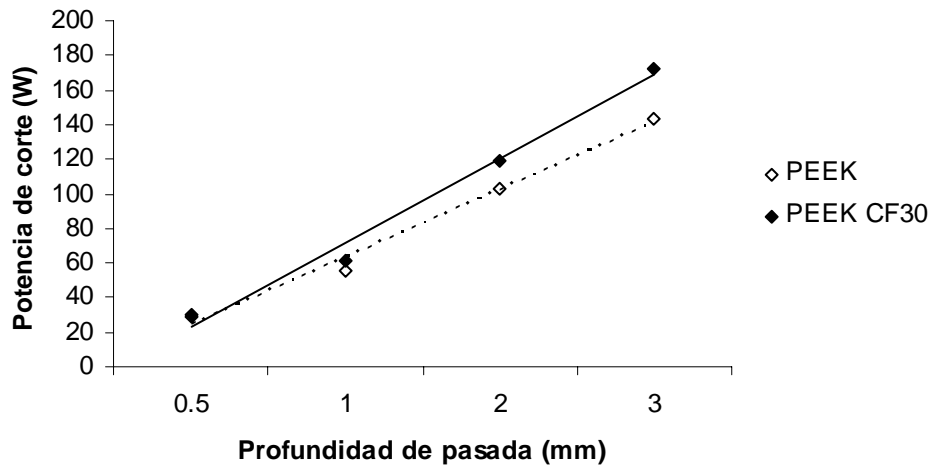
Figura 6.21 - Evolución de la fuerza de mecanizado en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

Se observa cómo la fuerza de mecanizado aumenta lineal y significativamente con la profundidad de pasada en todos los casos. El efecto del material y de la herramienta es idéntico a lo comentado en el apartado 6.3.

La Figura 6.22 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.



a)



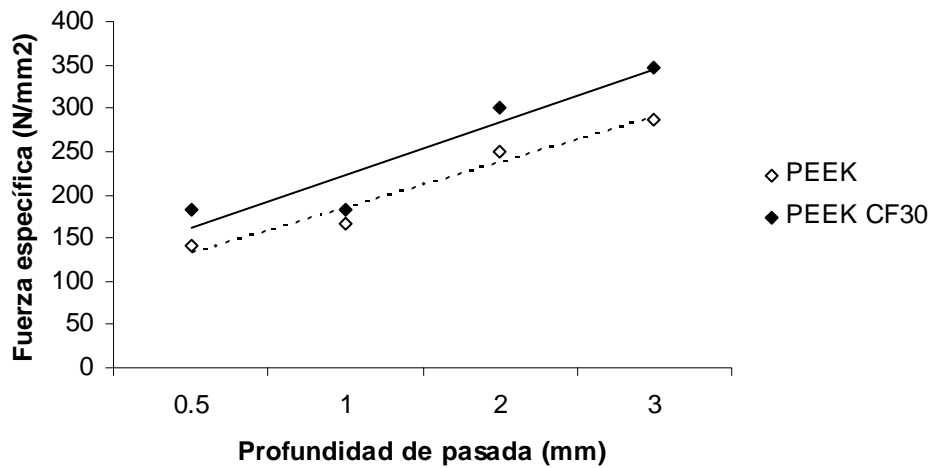
b)

Figura 6.22 - Evolución de la potencia de corte en función de la profundidad de pasada:

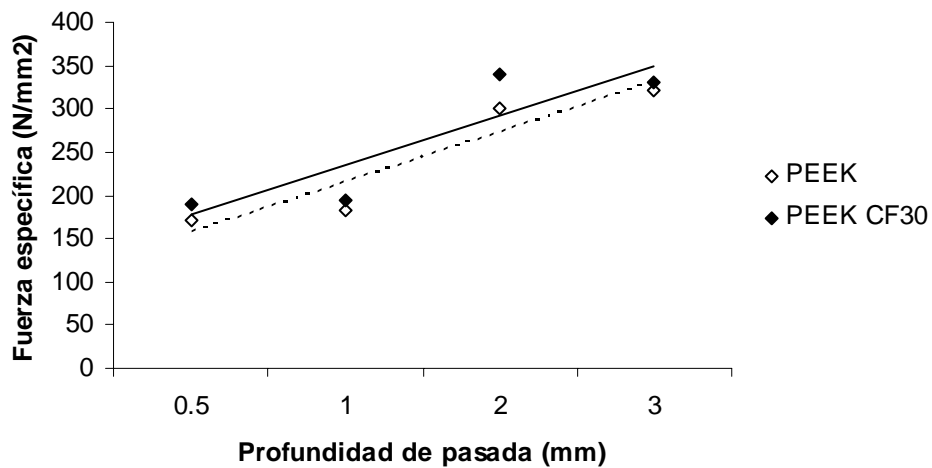
a) PCD, b) K10

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 6.23 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.



a)



b)

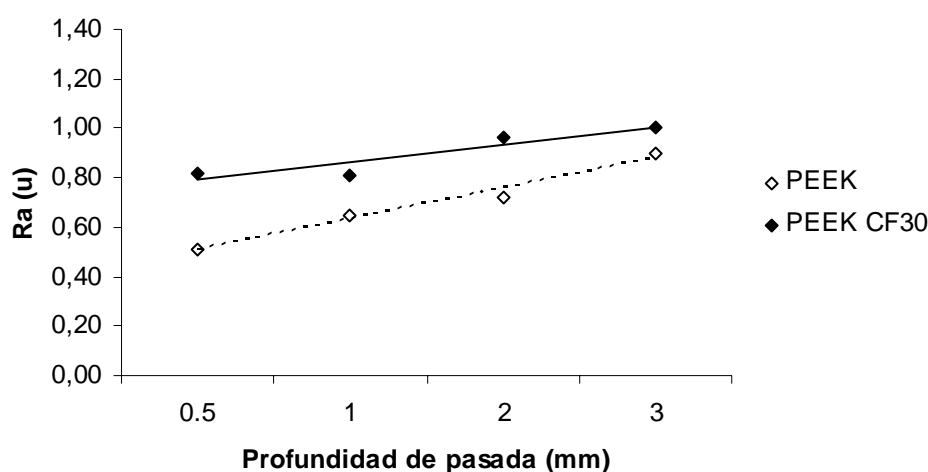
Figura 6.23 - Evolución de la fuerza específica de corte en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

La fuerza específica de corte aumenta a medida que aumenta la profundidad de pasada en todos los casos analizados. Son válidos los mismos comentarios expresados para las poliamidas en la sección 6.5.1.1. Dado que un proceso de mecanizado será tanto más eficiente cuanto menor sea el valor de la fuerza específica de corte, es obvio que, desde este punto de vista, interesa trabajar con profundidades de pasada bajas.

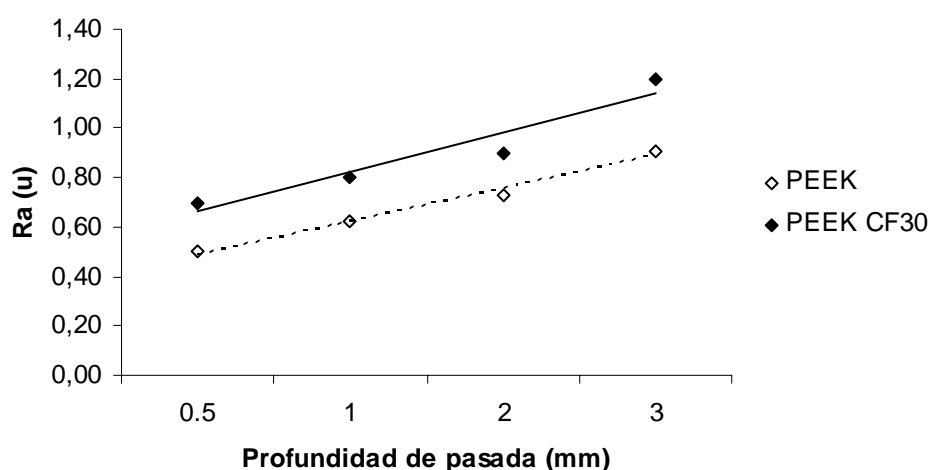
### 6.5.2.2. Acabado superficial

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 (véase Tabla C.18 del Anexo C).

La Figura 6.24 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 de nuevo, tal y como se verificó en el epígrafe 6.4.3., el efecto de las fibras de refuerzo en el PEEK CF30, que se traducen en mayor rugosidad con relación al material no reforzado.



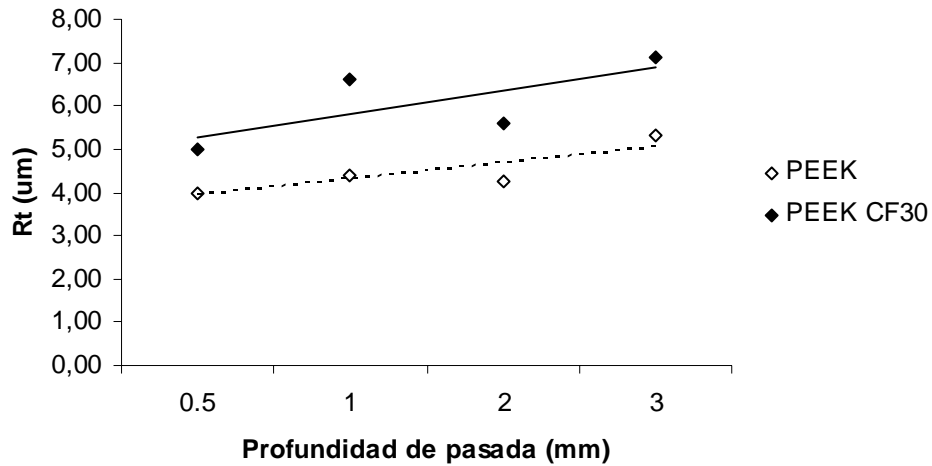
a)



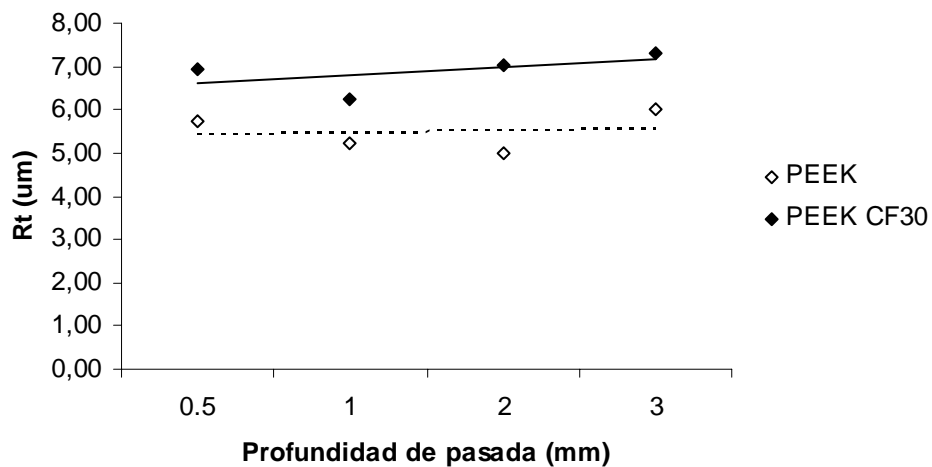
b)

Figura 6.24 - Evolución de Ra en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

La Figura 6.25 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 6.25 - Evolución de  $R_t$  en función de la profundidad de pasada: a) PCD, b) K10

### 6.6. Efecto de la herramienta

A continuación, se va a estudiar el efecto de la geometría de la herramienta de corte, en particular, el efecto del rompe virutas. Tal y como quedó de manifiesto en el Capítulo 3,

los ensayos se realizaron para una velocidad de corte constante de  $V_c=100$  m/min y una profundidad de pasada de 2 mm, variando la velocidad de avance.

Es fundamental la adecuación de la geometría de la herramienta al tipo de operación de mecanizado y a las características del material a mecanizar. Para una herramienta de punta sencilla, se especifican normalmente siete elementos: ángulo de ataque posterior, ángulo de ataque lateral, ángulo de incidencia frontal, ángulo de incidencia lateral, ángulo de filo de corte frontal, ángulo del filo de corte lateral y radio de la punta, según se puede apreciar en la Figura 6.26 (Groover, 1996).

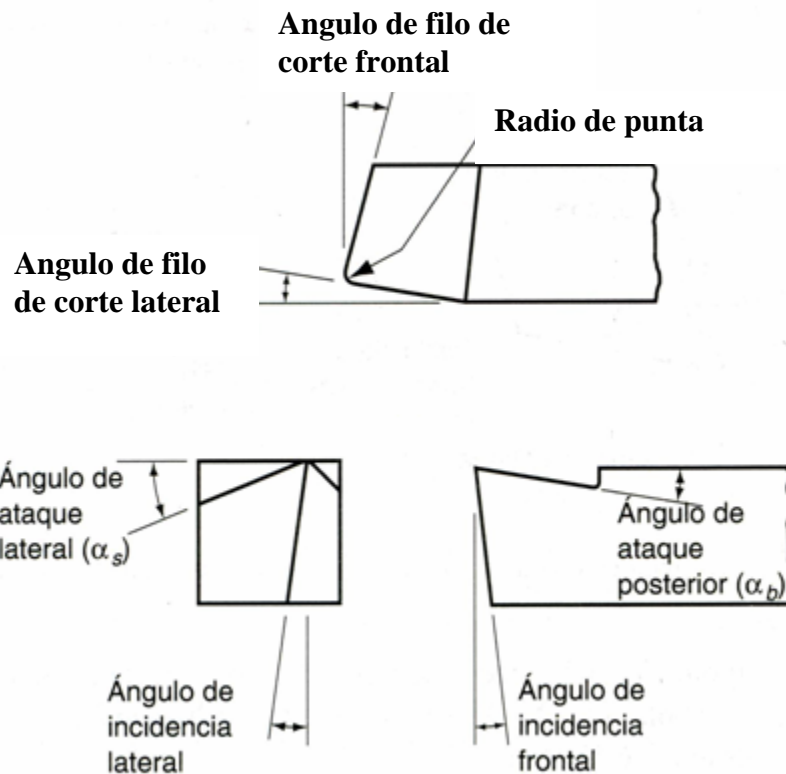


Figura 6.26. Elementos fundamentales de la geometría de una herramienta de corte (Groover, 1996)

La forma característica de la viruta depende del material a mecanizar, de los parámetros funcionales de corte y de la geometría de la herramienta (Groover, 1996). La generación de virutas largas y continuas, propias de materiales homogéneos, tales como los metales o los polímeros termoplásticos no reforzados, pueden ocasionar problemas al enredarse e interferir negativamente en el proceso de corte (empeoran el acabado, dificultan el mecanizado, etc.). Esta circunstancia es especialmente grave cuando se utilizan centros de

mecanizado o, en general, máquinas herramienta con control numérico con funcionamiento no asistido. Por ello, es preciso evitar la formación de viruta continua recurriendo al rompe-virutas que, en esencia, obliga a la viruta a enrollarse con menor radio, propiciando su fractura. Según se comentó en el Capítulo 3, también se obtuvieron virutas semi-continuas en el mecanizado de los materiales reforzados, de modo que el efecto del rompe virutas debe resultar positivo también en este caso.

El rompe virutas aumenta el ángulo efectivo de ataque de la herramienta y, por ende, el ángulo del plano de corte (*Kalpakjian y Schmid, 2002*). Aunque tradicionalmente el rompe virutas estaba constituido por una placa metálica fijada a la cara de ataque de la herramienta, en la actualidad se suele incorporar en el propio diseño de la herramienta, como se puede observar en la Figura 6.27.

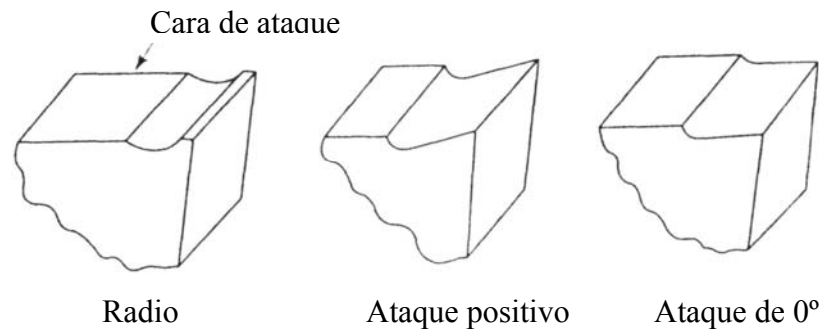


Figura 6.27 - Variación del ángulo de ataque del rompe virutas

En este epígrafe, se trata de demostrar, por un lado, el efecto positivo del rompe virutas, en los dos tipos de herramienta utilizados, que se traduce generalmente en una reducción de las fuerzas de corte y, por otro, analizar la viabilidad del uso de las herramientas revestidas de diamante (revestimiento por deposición química en fase vapor), valorando el consumo de energía y el acabado, teniendo en cuenta su menor coste en comparación con las pastillas de diamante policristalino. Además, debido a las características y al proceso de obtención del diamante policristalino, resulta complicado fabricar rompe virutas en las pastillas PCD. Tiene, pues, gran interés estudiar la viabilidad del revestimiento de diamante con rompe virutas frente al diamante policristalino convencional, ya que, sobre la base de los resultados que se van a presentar, se puede convertir en un sustituto idóneo para este tipo de materiales.

En concreto, se trata de comparar, por un lado, la herramienta CVD, revestida de diamante, con rompe virutas, con la pastilla PCD normal, y, por otro, la herramienta H10, de la

familia de los carburos cementados, con rompe virutas, con la herramienta base K10. En este último caso sólo se verificará el efecto del rompe virutas, ya que se trata de una pastilla sin revestimiento. La referencia concreta de cada herramienta, así como su geometría, se detalló en el Capítulo 3.

Las herramientas revestidas de diamante son muy efectivas para mecanizar materiales no ferrosos y abrasivos, como las aleaciones de aluminio con contenido de silicio, los materiales compuestos de matriz metálica reforzados con fibras y el grafito, habiéndose datado mejoras de hasta 10 veces la vida de la herramienta, en comparación con las herramientas no recubiertas (*Köpf et al., 2006; Cabral et al., 2006; Kalpakjian y Schmid, 2002*). Pues bien, el interés de este trabajo de investigación es también estudiar el comportamiento de estas herramientas revestidas de diamante cuando se mecanizan materiales compuestos de matriz polimérica con y sin fibras de refuerzo (*Mata y Davim, 2007-a y 2007-b*). En concreto, se ha utilizado (véase Capítulo 3) revestimiento de diamante en capa delgada por deposición química en fase vapor (CVD) sobre un sustrato de carburo cementado.

A continuación, se presentan los resultados de fuerzas de corte (fuerza de mecanizado, potencia de corte y fuerza específica de corte) y acabado superficial ( $R_a$  y  $R_t$ ) para los diferentes materiales ensayados. Es importante destacar que, en el caso de las poli (éter-éter-cetonas) (PEEK) sólo se presentarán los resultados para el PEEK no reforzado y para el PEEK CF30, reforzado con fibras de carbono. Sobre el PEEK GF30 no se realizaron este tipo de ensayos, al no disponer de más material. No obstante, sobre la base de los resultados anteriores, se pueden anticipar mayores valores de fuerzas de corte y de rugosidad en comparación con el PEEK y el PEEK CF30. Es previsible, por lo demás, un efecto similar del rompe virutas y del revestimiento al que se evidenciará en el resto de materiales ensayados.

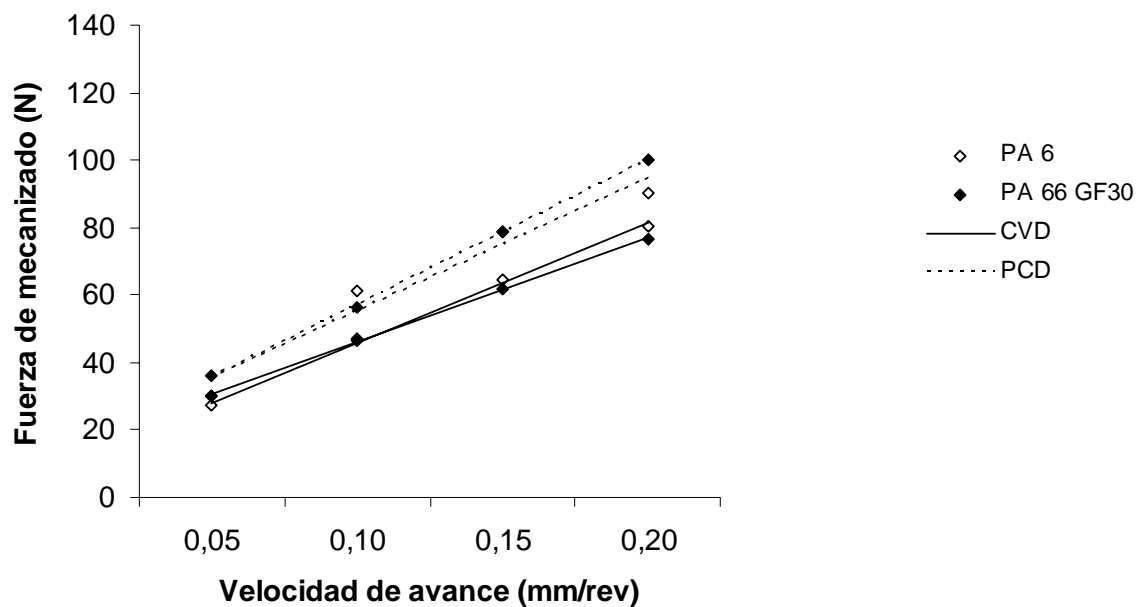
### **6.6.1. Poliamidas**

#### **6.6.1.1. Fuerza y potencia de corte**

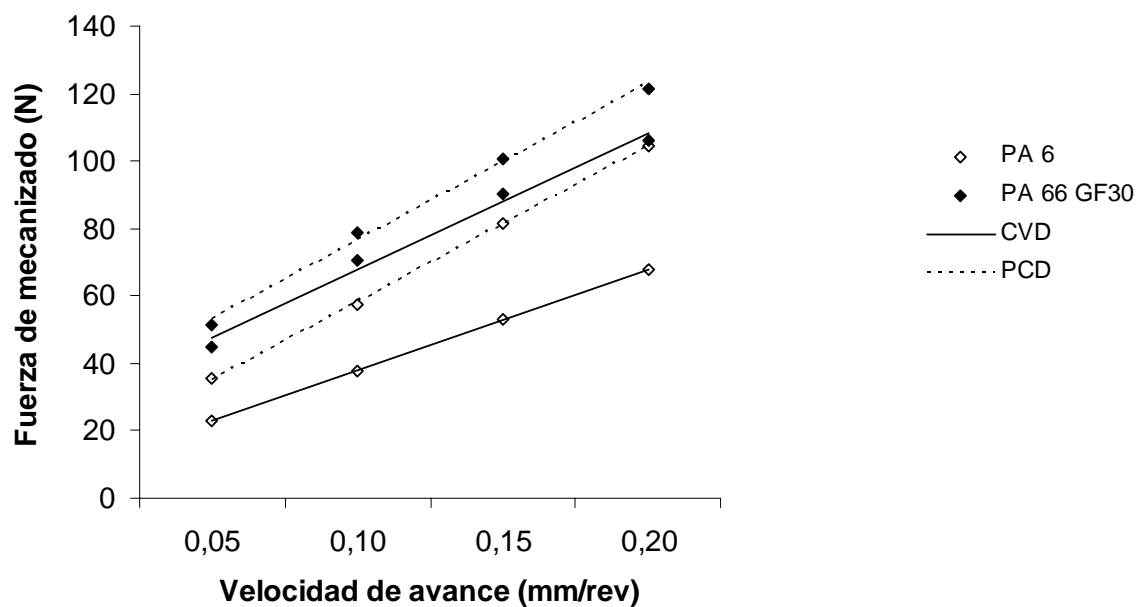
Los valores medidos de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  y los valores calculados de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$ , en función del tipo de herramienta, se pueden consultar en las Tablas C.19 y C.20 del Anexo C.



La Figura 6.28 muestra la evolución de la fuerza de mecanizado con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados.



a)



b)

Figura 6.28 - Evolución de la fuerza de mecanizado con la velocidad de avance:

a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

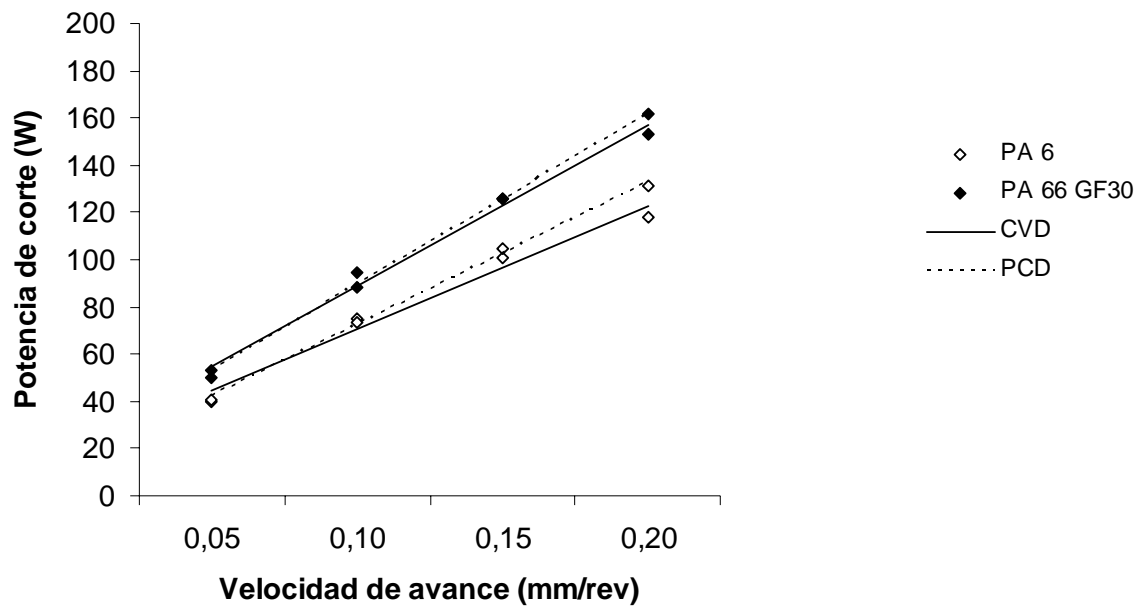
Se obtienen valores menores de fuerzas de mecanizado al trabajar con las herramientas que incorporan rompe virutas, tanto CVD como H10. Este hecho es importante, ya que evidencia el efecto de la geometría de la herramienta y, además, en el caso particular de la herramienta CVD, el efecto positivo del recubrimiento de diamante. Por otra parte, se observa cómo las diferencias entre el material no reforzado y el material reforzado se reducen al utilizar las herramientas de diamante. Además, la utilización de estas herramientas conduce a valores más bajos de la fuerza de mecanizado.

La Figura 6.29 muestra la evolución de la potencia de corte con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados.

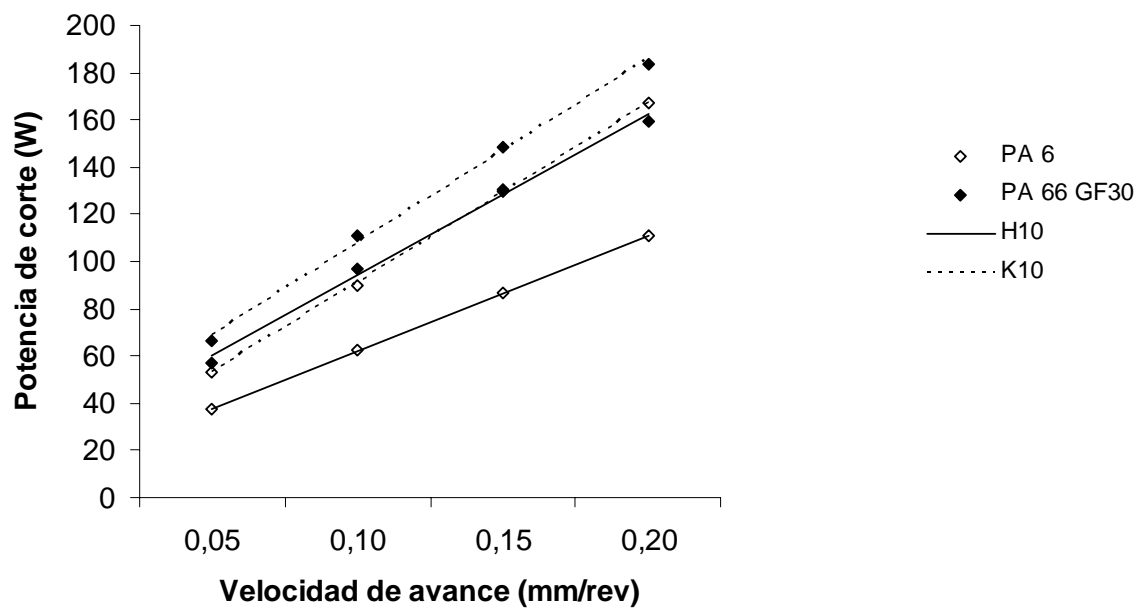
Se obtienen valores menores de potencia de corte al trabajar con las herramientas que incorporan rompe virutas, tanto CVD como H10. Una reducción en el valor de la potencia de corte implica una reducción en los costes de producción, circunstancia muy deseable en cualquier caso.

La Figura 6.30 muestra la evolución de la fuerza específica de corte con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados.

Se obtienen valores menores de fuerza específica de corte al trabajar con las herramientas que incorporan rompe virutas, tanto CVD como H10. Dado que la fuerza específica de corte proporciona una indicación de la eficiencia del proceso (en otras palabras, rendimiento del proceso), es deseable trabajar con las herramientas dotadas de rompe virutas.



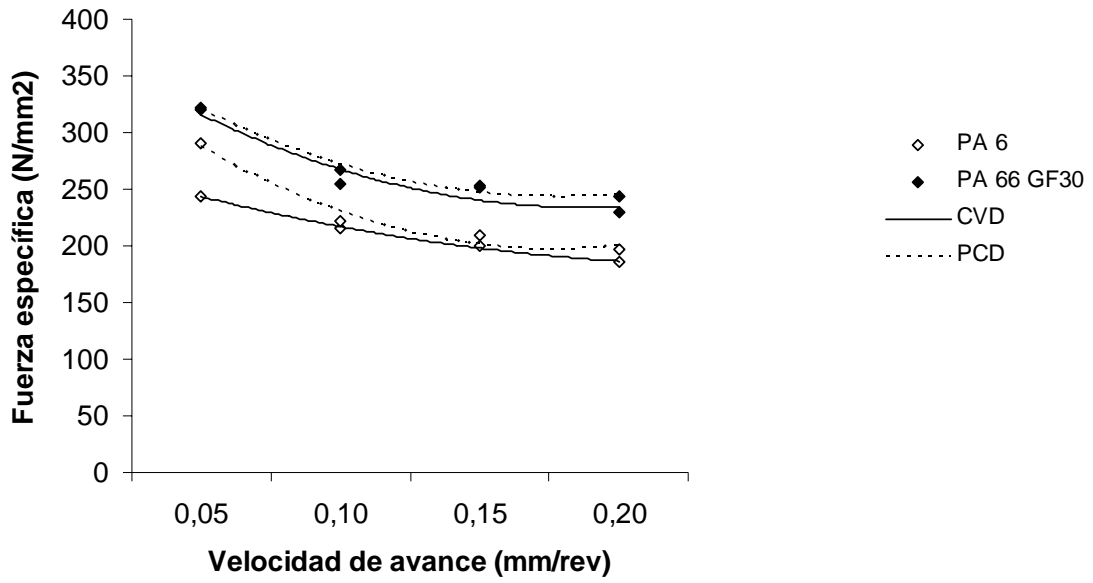
a)



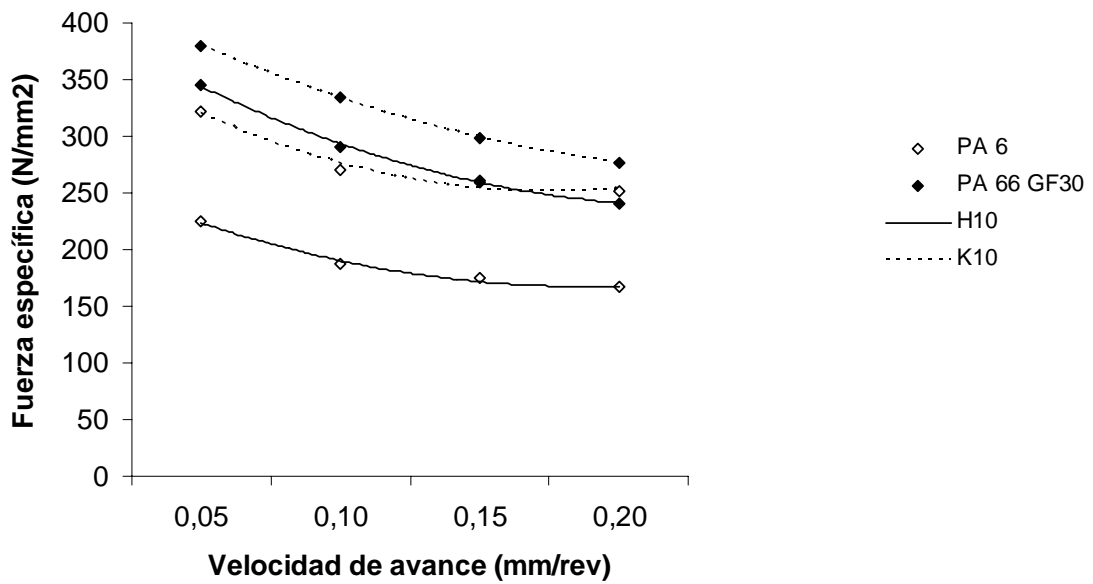
b)

Figura 6.29 – Evolución de la potencia de corte con la velocidad de avance:

a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10



a)



b)

Figura 6.30 – Evolución de la fuerza específica de corte con la velocidad de avance:  
a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Finalmente, se representa en la Figura 6.31 el ratio  $F_a/F_c$  para los dos materiales y las cuatro herramientas, ante unas determinadas condiciones de corte.

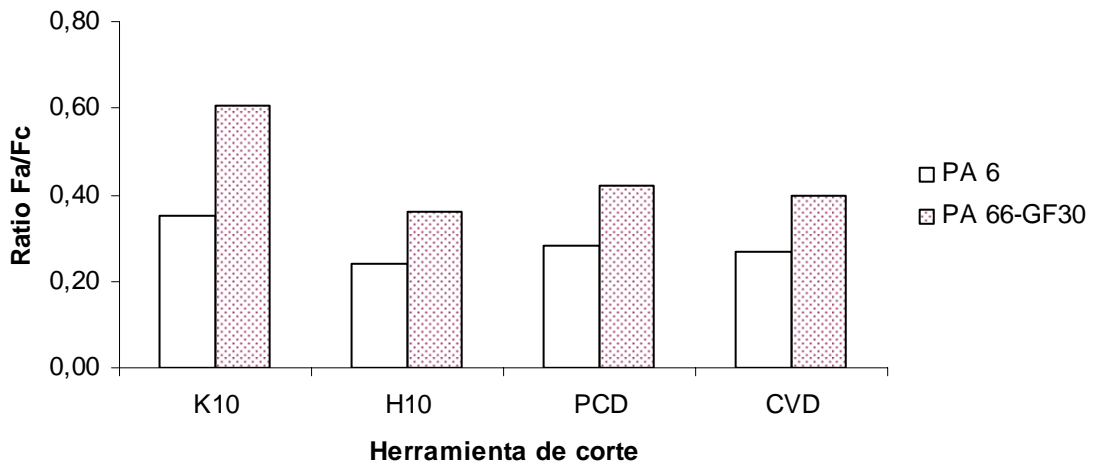


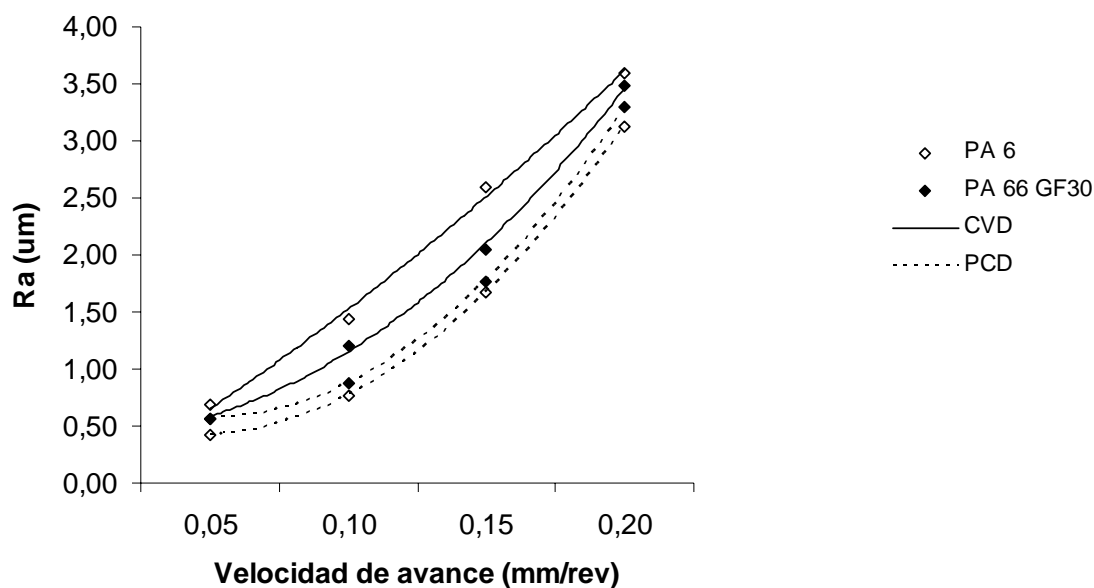
Figura 6.31 – Representación del ratio  $F_a/F_c$  para los dos materiales y las tres herramientas ( $V_c=100$  m/min,  $V_a=0.10$  mm/rev)

Como se puede observar, las herramientas H10, PCD y CVD son las que presentan los valores más bajos del ratio, lo cual indica que con ellas se consigue una mayor eficiencia del proceso de mecanizado, quedando de manifiesto el efecto del rompe virutas (H10 y CVD) y del material de la herramienta (PCD y CVD). Esto es así porque, cuanto más baja sea la fuerza de avance con relación a la fuerza de corte, mayor cantidad de energía se invierte en la acción de corte propiamente dicha. Se observa que PCD y CVD conducen a resultados muy similares en las poliamidas, con ligera diferencia a favor de la herramienta CVD en el caso del material reforzado, circunstancia que marca sin duda una tendencia interesante.

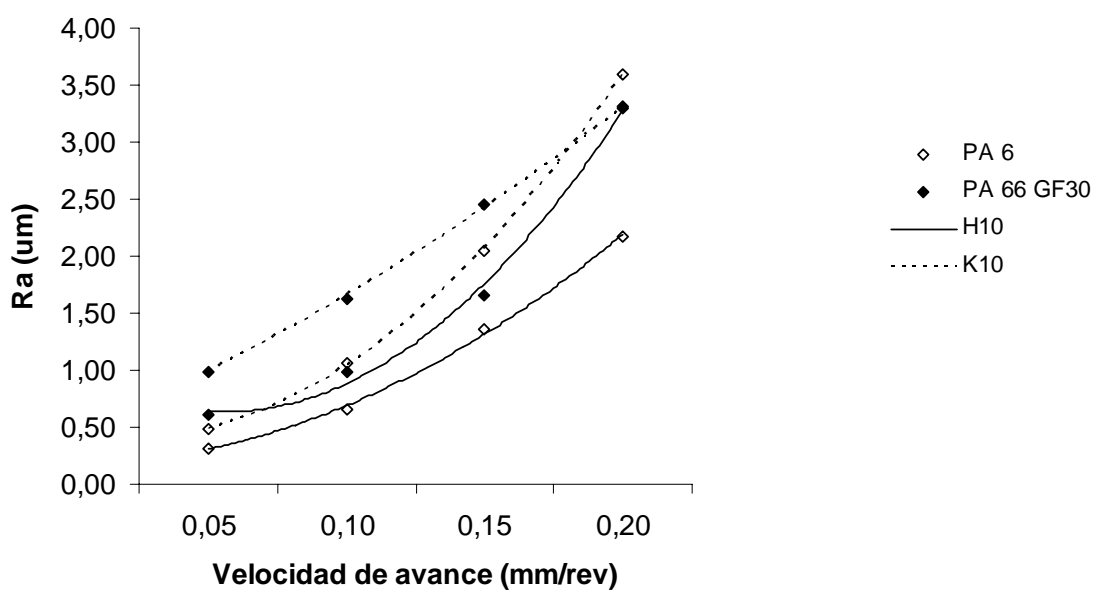
### 6.6.1.2. Acabado superficial

Los valores de los diferentes parámetros de rugosidad medidos, en función del tipo de herramienta, se pueden consultar en la Tabla C.21 del Anexo C.

La Figura 6.32 muestra la evolución de la rugosidad media ( $R_a$ ) con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados.



a)



b)

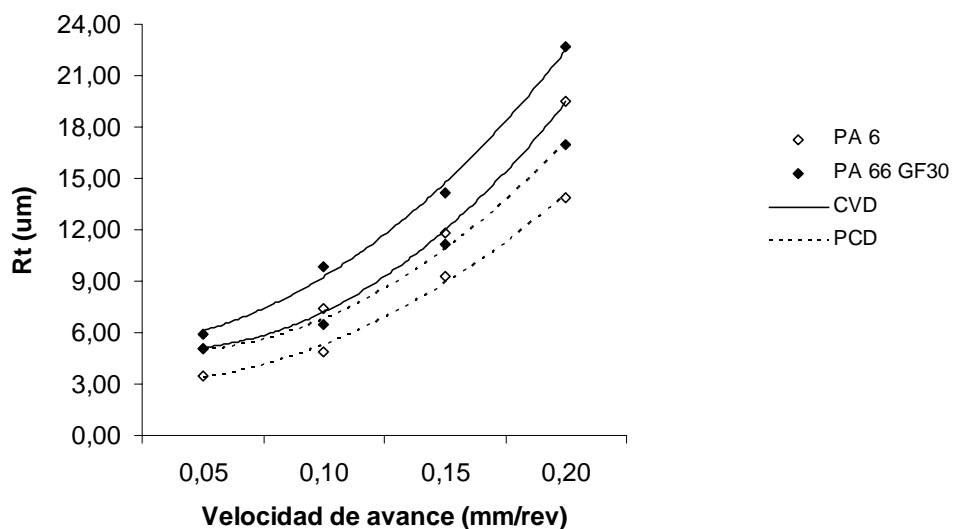
Figura 6.32 – Evolución de Ra con la velocidad de avance:

a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

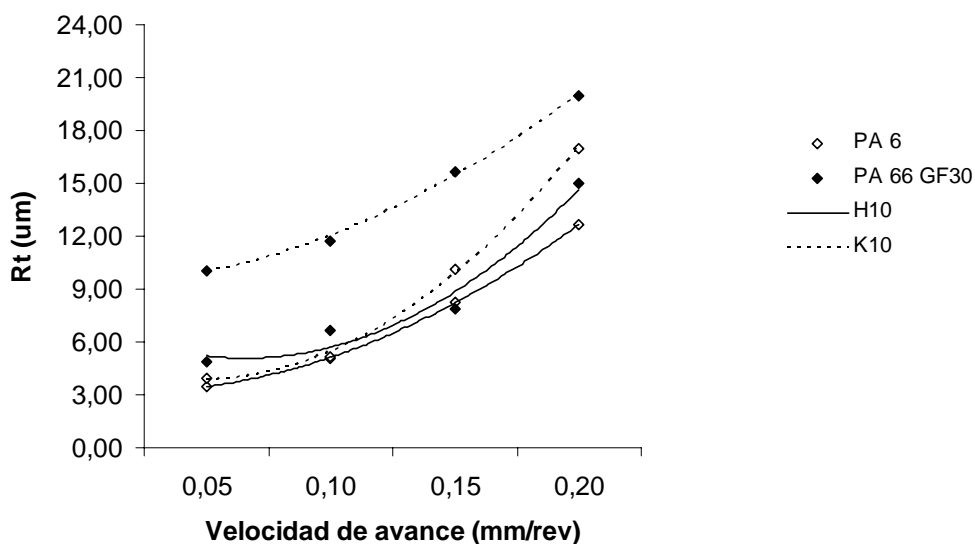
En este caso, se obtienen valores de rugosidad ligeramente mayores la herramienta revestida frente a la PCD. Sin embargo, la utilización de la herramienta H10 conduce a acabados superficiales de mayor calidad en comparación con la herramienta convencional K10. En términos de precisión dimensional (IT), se obtienen calidades superficiales

similares cuando comparamos la herramienta convencional con la herramienta dotada de rompe virutas.

La Figura 6.33 muestra la evolución de la rugosidad máxima ( $R_t$ ) con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados. Son válidos comentarios similares a los realizados para el caso de  $R_a$ .



a)



b)

Figura 6.33 – Evolución de  $R_t$  con la velocidad de avance:

a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Al igual que ocurre con la herramienta H10, dotada de rompe virutas, eran de esperar mejores resultados en términos de rugosidad con la herramienta CVD, comparada con la PCD. Las razones por las que esto no ocurre pueden encontrarse en diferentes circunstancias. Por una parte, el revestimiento de diamante aumenta tanto el radio de punta como especialmente el radio de la arista de corte, según se puede apreciar en las Figuras 6.34 y 6.35, y, por otra, el propio revestimiento tiene una rugosidad mayor en la cara de ataque, según medidas realizadas, en comparación con la herramienta no revestida. Parece lógico pensar que el peor acabado superficial del revestimiento deberá afectar a las superficies mecanizadas. La observación de la Figura 6.35 también permite poner de manifiesto signos de desgaste en la herramienta revestida.

Con todo, resulta ventajoso el uso de la herramienta revestida de diamante, ya que es más barata y permite fácilmente fabricarse con rompe virutas, en comparación con las herramientas de diamante policristalino.

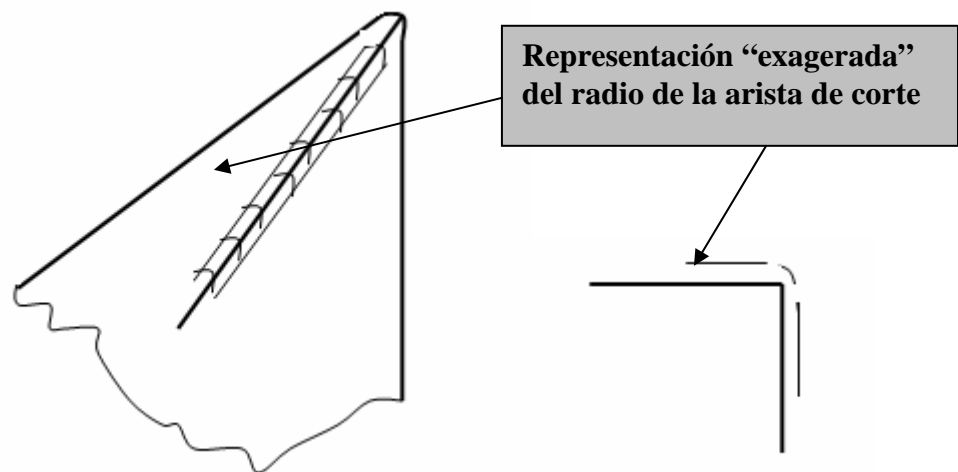


Figura 6.34 – Representación esquemática del radio de la arista de corte



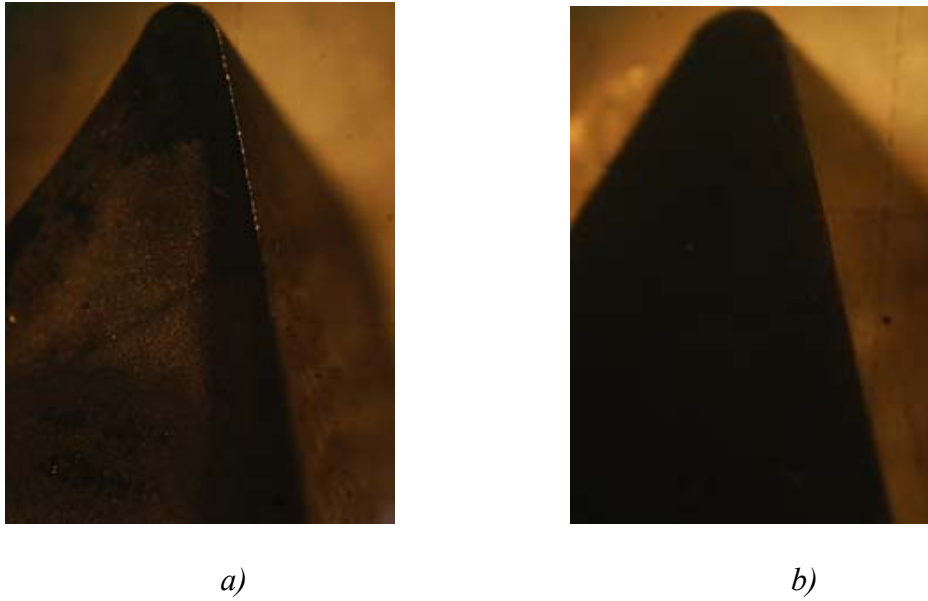


Figura 6.35 – Ángulo de la arista de corte: a) CVD, b) PCD

Finalmente, se representa en la Figura 6.36 el ratio  $Ra/Rt$  para los dos materiales y las cuatro herramientas, ante unas determinadas condiciones de corte.

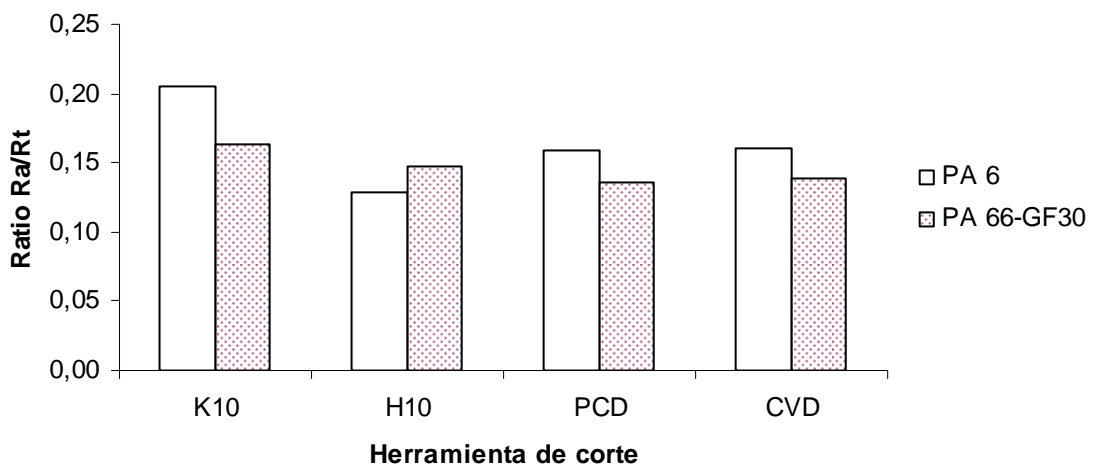


Figura 6.36 - Representación del ratio  $Ra/Rt$  para los dos materiales y las tres herramientas ( $V_c=100$  m/min,  $V_a=0.1$  mm/rev)

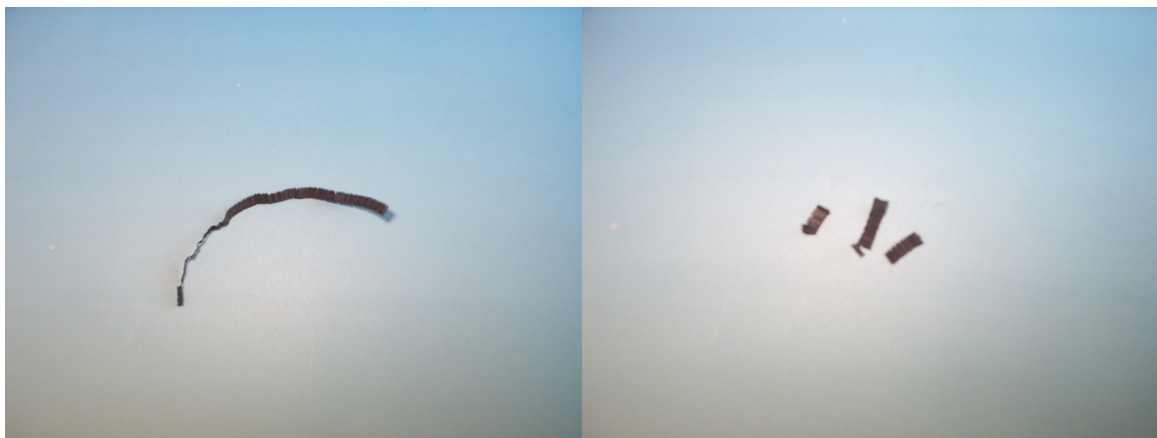
En primer lugar, se observan menores valores del ratio para el material reforzado, lo cual puede explicarse porque en este material la rugosidad máxima, medida por  $Rt$  (irregularidades), es mayor que en el material no reforzado (al aumentar  $Rt$  se reduce el cociente, si no aumenta proporcionalmente  $Ra$ ).

Por otro lado, las herramientas PCD y H10 presentan los valores más bajos, debido a la menor rugosidad media ( $R_a$ ) que se obtiene al trabajar con estas herramientas. En el caso del material reforzado, H10, PCD y CVD presentan valores muy similares, lo que viene a reforzar los buenos resultados obtenidos con la herramienta revestida, comparables a los de la PCD.

### 6.6.1.3. Tipo de viruta

Finalmente, se analizará el tipo y forma de la viruta obtenida, en función del tipo de herramienta. En el Capítulo 4 se clasificaron las virutas obtenidas de acuerdo con la Norma ISO 3685, teniendo en cuenta los diferentes materiales y las condiciones de corte; pues bien, ahora se trata de poner de manifiesto el efecto del rompe-virutas.

En la Figura 6.37 se observan, a modo de ejemplo, dos fotografías de virutas obtenidas en el caso del material PA 66-GF30, para verificar el efecto del rompe virutas. Según se aprecia en b) el rompe virutas genera virutas discontinuas y con multitud de microgrietas.



a)

b)

Figura 6. 37 – Virutas obtenidas al mecanizar la poliamida PA 66-GF30:

a) Herramienta plana, b) Herramienta con rompe-virutas.

Por otra parte, la presencia de fibras de refuerzo, con independencia del tipo de herramienta utilizada, influye en la forma de la viruta, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.38. En el caso a), que corresponde a la PA 6, la viruta presenta bordes continuos, sin grietas significativas. En cambio, en el caso b), correspondiente a la PA 66-GF30, las fibras de vidrio de refuerzo inducen la aparición de numerosas grietas, que se concentran mayoritariamente en el borde de tracción (borde exterior de la viruta) (Figura 6.39). La progresión de estas grietas es sin duda mucho más acusada cuando se utiliza el rompe

virutas, llegado a la ruptura frecuente, de modo que se fragmenta en pedazos muy pequeños.

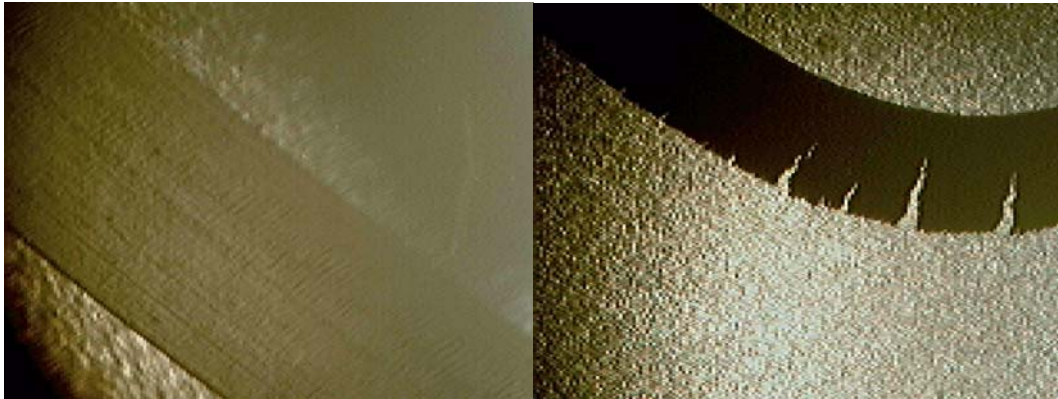


Figura 6.38 – Efecto de las fibras de refuerzo en la morfología de la viruta (3x):

a) PA 6, b) PA 66-GF30

La Figura 6.38 muestra en esquemas las zonas de la viruta sometidas a tracción y a compresión. Con independencia de la forma de viruta obtenida, la propia forma de la pieza a mecanizar origina estas dos zonas con comportamiento diferente. Obviamente, la zona más propensa a la apertura de grietas es siempre la de tracción.

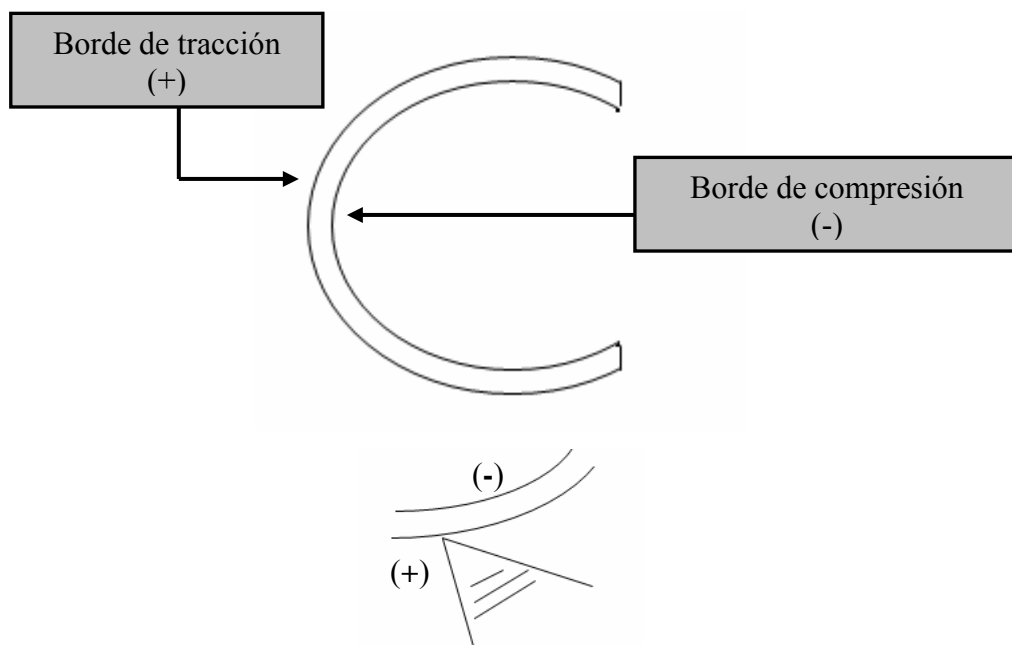


Figura 6.39 – Identificación de los bordes de tracción/compresión en una viruta tipo

## 6.6.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

### 6.6.2.1. Fuerza y potencia de corte

Los valores medidos de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  y los valores calculados de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$ , en función del tipo de herramienta, se pueden consultar en las Tablas C.22 y C.23 del Anexo C.

La Figura 6.40 muestra la evolución de la fuerza de mecanizado con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados.

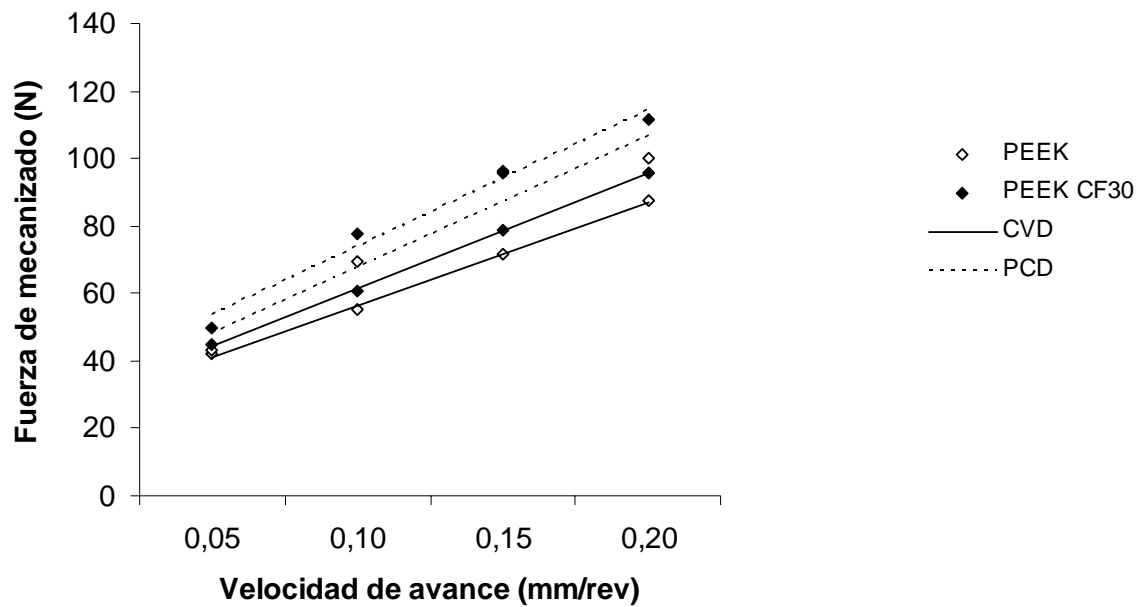
Se obtienen valores menores de fuerzas de mecanizado al trabajar con las herramientas que incorporan rompe virutas, tanto CVD como H10. Este hecho es importante, ya que evidencia el efecto de la geometría de la herramienta y, además, en el caso particular de la herramienta CVD, el efecto positivo del recubrimiento de diamante. Además, la utilización de estas herramientas conduce a valores más bajos de la fuerza de mecanizado.

La Figura 6.41 muestra la evolución de la potencia de corte con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados.

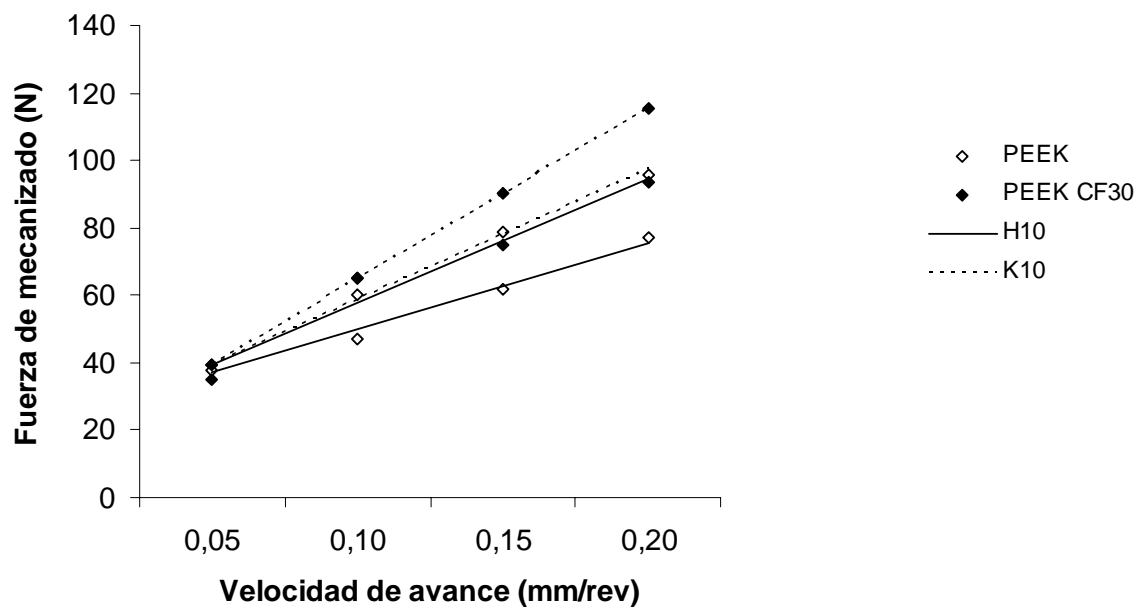
Se obtienen valores menores de potencia de corte al trabajar con las herramientas que incorporan rompe virutas, tanto CVD como H10. Una reducción en el valor de la potencia de corte implica una reducción en los costes de producción, circunstancia muy deseable en cualquier caso. No obstante, la diferencia entre los distintos tipos de herramienta es poco significativa, en cuanto a potencia de corte, cuando se trabaja a velocidades de avance bajas.

La Figura 6.42 muestra la evolución de la fuerza específica de corte con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados.

Se obtienen valores menores de fuerza específica de corte al trabajar con las herramientas que incorporan rompe virutas, tanto CVD como H10. Dado que la fuerza específica de corte proporciona una indicación de la eficiencia del proceso (en otras palabras, rendimiento del proceso), es deseable trabajar con las herramientas dotadas de rompe virutas.



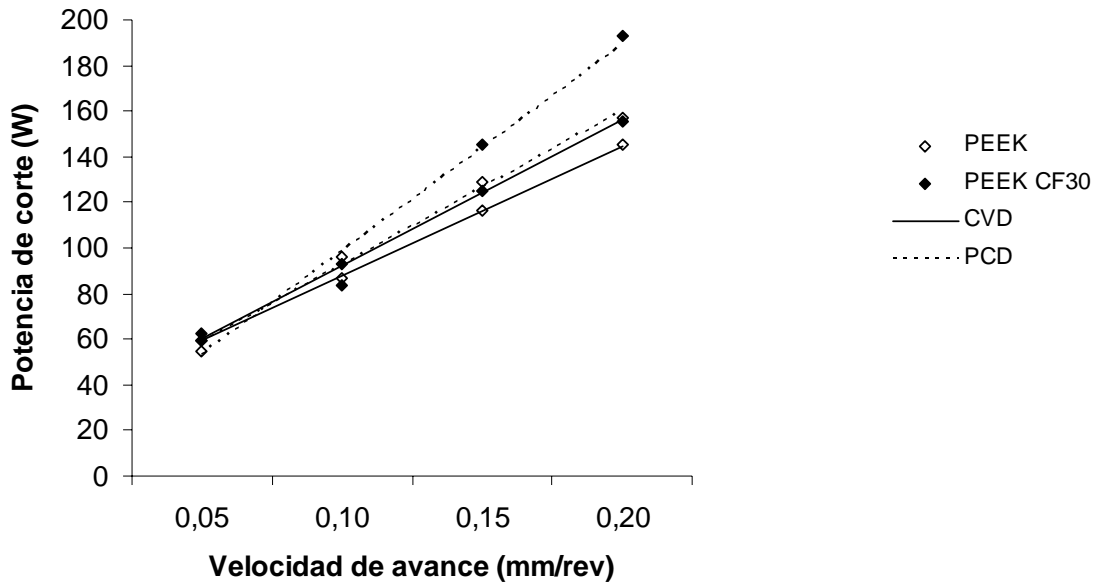
a)



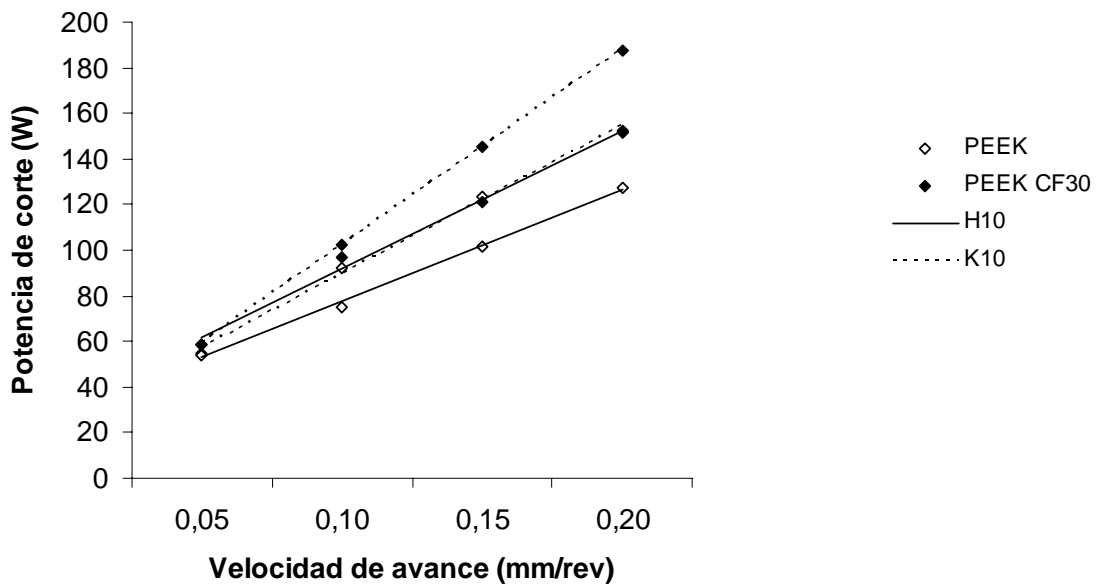
b)

Figura 6.40 – Evolución de la fuerza de mecanizado con la velocidad de avance:

a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10



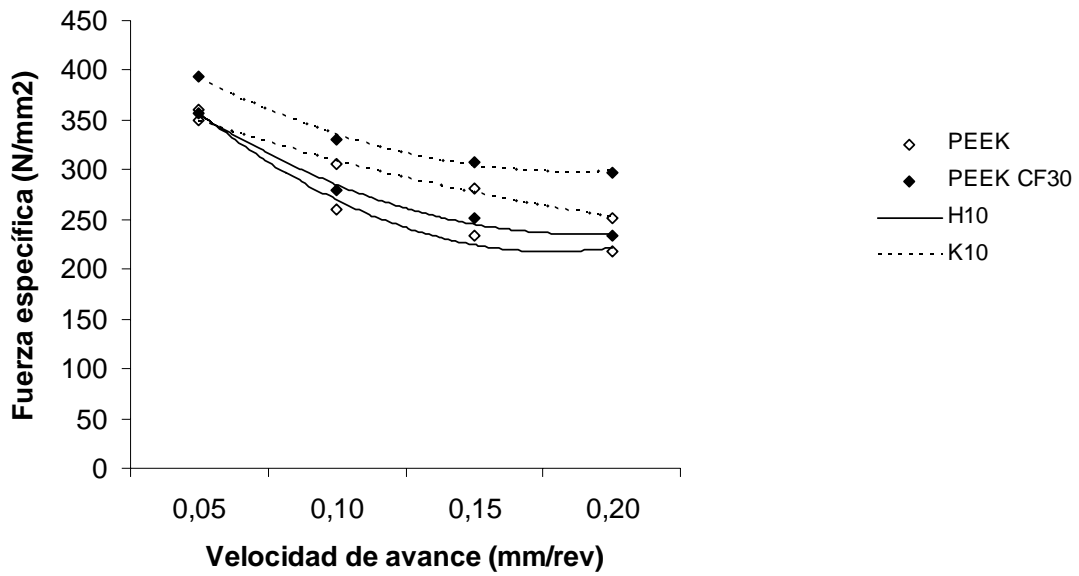
a)



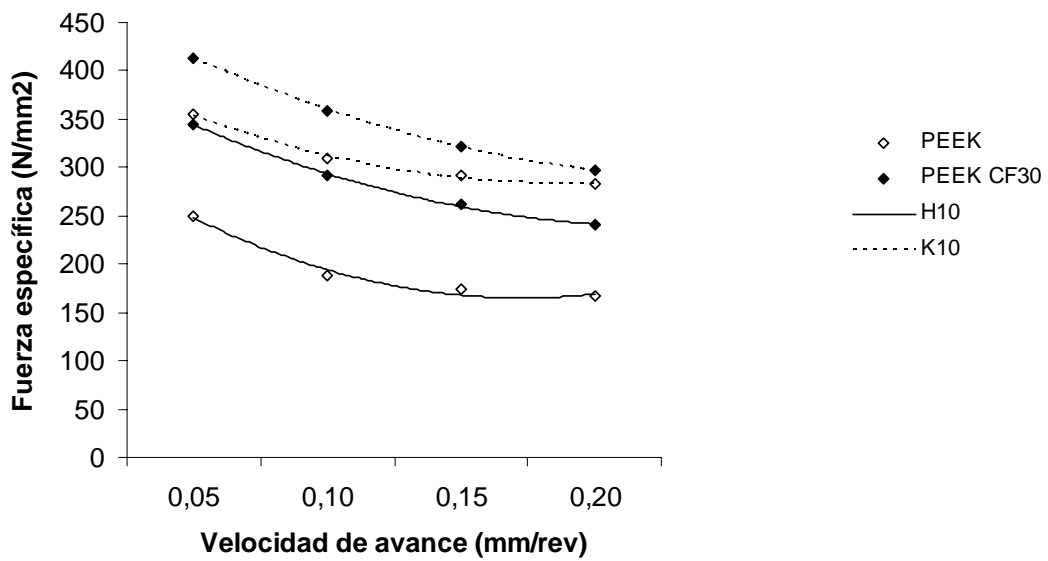
b)

Figura 6.41 – Evolución de la potencia de corte con la velocidad de avance:

a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10



a)



b)

Figura 6.42 – Evolución de la fuerza específica de corte con la velocidad de avance:

a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Finalmente, se representa en la Figura 6.43 el ratio  $F_a/F_c$  para los dos materiales y las herramientas K10, PCD y CVD, ante unas determinadas condiciones de corte.

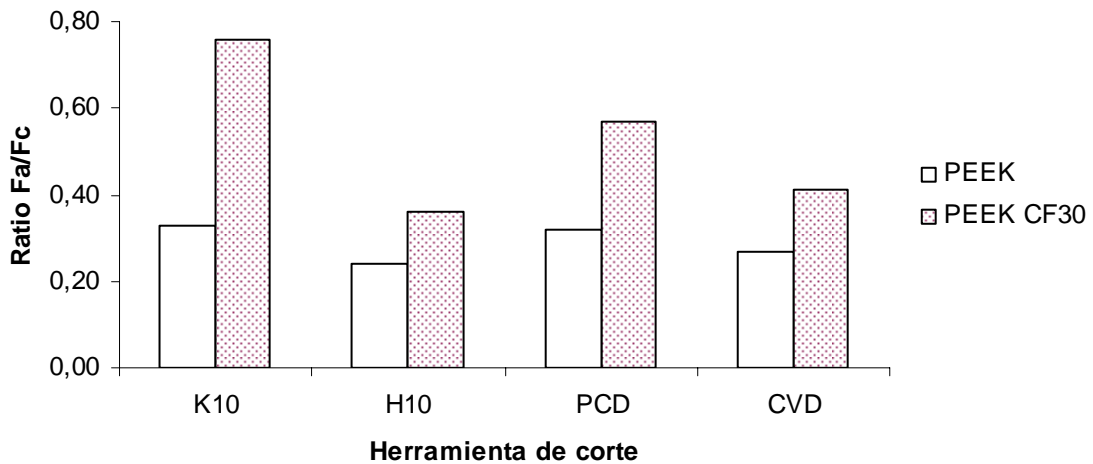


Figura 6.43 - Representación del ratio  $F_a/F_c$  para los dos materiales y las tres herramientas ( $V_c=100$  m/min,  $V_a=0.1$  mm/rev)

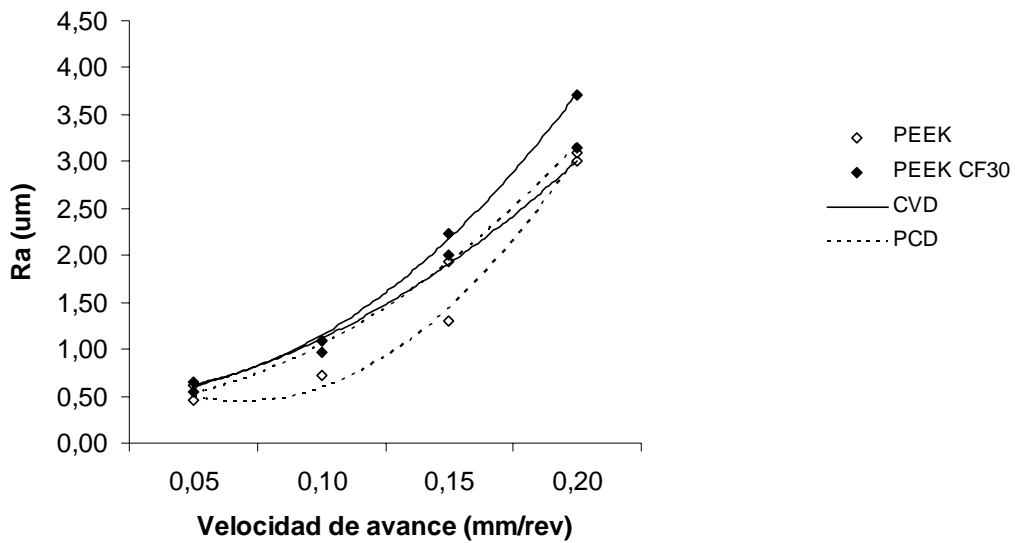
Como se puede observar, las herramientas H10 y CVD son las que presentan los valores más bajos del ratio, lo cual indica que con ellas se consigue una mayor eficiencia del proceso de mecanizado. Este efecto es más acusado en el caso del material reforzado, hecho relevante que refuerza la mejor maquinabilidad de este tipo de materiales cuando se utiliza las herramientas con rompe virutas.

#### 6.6.2.2. Acabado superficial

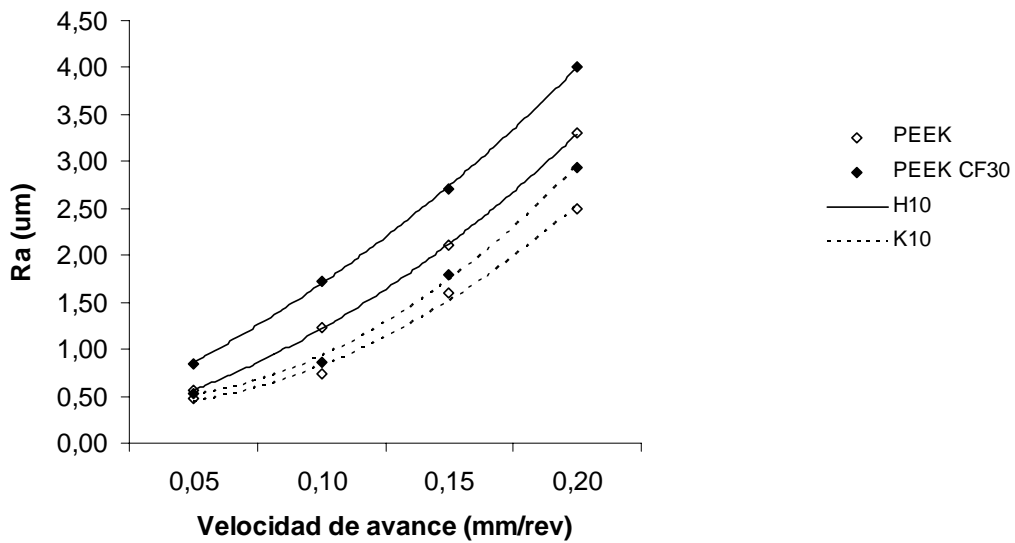
Los valores de los diferentes parámetros de rugosidad medidos, en función del tipo de herramienta, se pueden consultar en la Tabla C.24 del Anexo C.

La Figura 6.44 muestra la evolución de la rugosidad media ( $R_a$ ) con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados.





a)



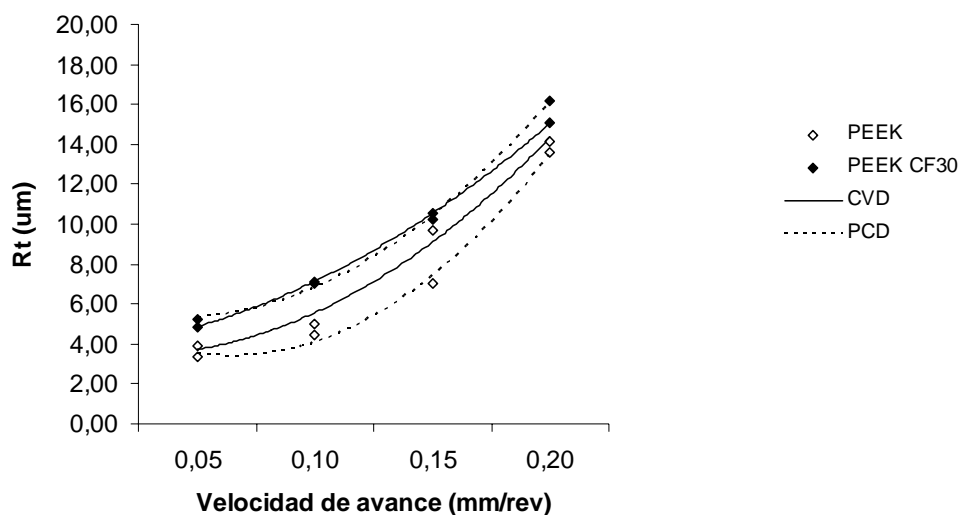
b)

Figura 6.44 – Evolución de Ra con la velocidad de avance:

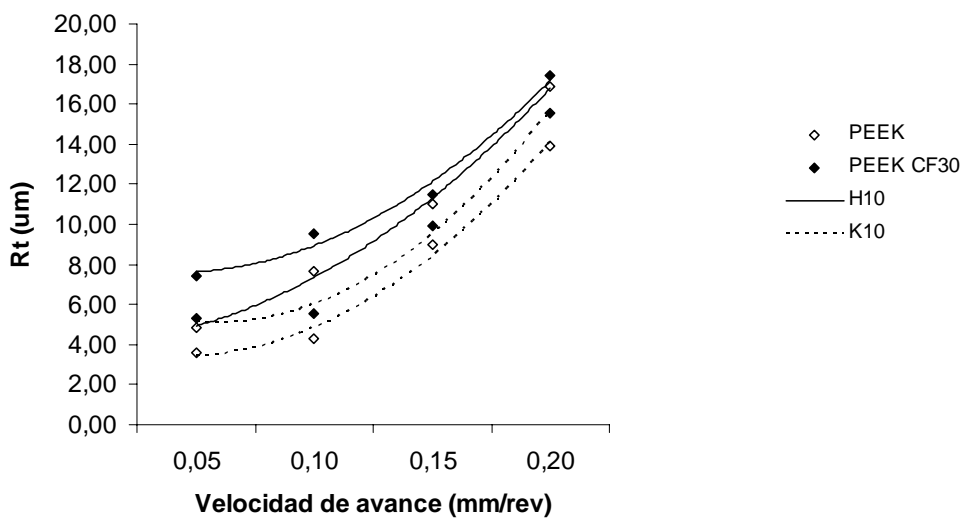
a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

En este caso, se obtienen valores de rugosidad ligeramente mayores tanto con la herramienta revestida como con la H10, frente a las pastillas PCD y K10, respectivamente. En términos de precisión dimensional (IT), se obtienen calidades superficiales similares cuando comparamos la herramienta convencional con la herramienta dotada de rompe virutas.

La Figura 6.45 muestra la evolución de la rugosidad máxima (Rt) con la velocidad de avance para las herramientas de diamante (a) y de carburos cementados (b) en los dos materiales ensayados. Se pueden extraer conclusiones similares a las puestas de manifiesto con el parámetro Ra.



a)



b)

Figura 6.45 – Evolución de Rt con la velocidad de avance:

a) CVD Vs PCD, b) H10 Vs K10

Los valores más altos de rugosidad obtenidos al mecanizar con CVD, en comparación con la herramienta PCD, pueden explicarse atendiendo a los mismos argumentos expuestos en el caso de las poliamidas.

Finalmente, se representa en la Figura 6.46 el ratio  $Ra/Rt$  para los dos materiales y las cuatro herramientas, ante unas determinadas condiciones de corte.

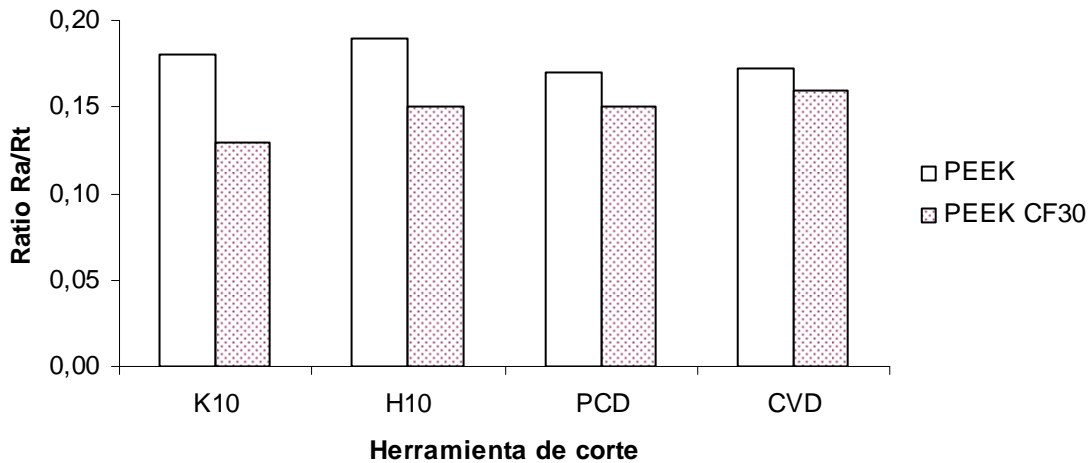


Figura 6.46 - Representación del ratio  $Ra/Rt$  para los dos materiales y las tres herramientas ( $V_c=100$  m/min,  $V_a=0.1$  mm/rev)

En primer lugar, se observan, al igual que ocurría en el caso de las poliamidas, menores valores del ratio para el material reforzado, circunstancia que se puede explicar utilizando el mismo argumento esgrimido en aquel caso.

Por otro lado, la herramienta K10 presenta valores más bajos y se puede explicar de la siguiente forma: es la herramienta que conduce a acabados con mayores brusquedades o irregularidades superficiales (picos más altos y bajos). Por el contrario, la herramienta CVD, a pesar de obtener peor acabado en términos de  $Ra$ , produce un acabado “más regular” ( $Rt$  aumenta en menor medida que lo hace  $Ra$  en comparación con PCD o K10). No podemos olvidar que mientras que  $Ra$  tiene significado estadístico (valor medio),  $Rt$  tiene significado físico (valores reales máximos-mínimos).

### 6.6.2.3. Tipo de viruta

Finalmente, se analizará el tipo y forma de la viruta obtenida, en función del tipo de herramienta. En el Capítulo 4 se clasificaron las virutas obtenidas de acuerdo con la Norma

ISO 3685, teniendo en cuenta los diferentes materiales y las condiciones de corte; pues bien, ahora se trata de poner de manifiesto el efecto del rompe virutas. En la Figura 6.47 se observan, a modo de ejemplo, dos fotografías de virutas obtenidas en el caso del material PEEK, para verificar el efecto del rompe virutas. Según se aprecia en b) el rompe virutas genera virutas discontinuas y con forma retorcida.



a)

b)

Figura 6.47 – Virutas obtenidas al mecanizar la poli (éter-éter-cetona) (PEEK):

a) Herramienta plana, b) Herramienta con rompe-virutas.

Por otra parte, la presencia de fibras de refuerzo, con independencia del tipo de herramienta utilizada, influye en la forma de la viruta, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.48. En el caso a), que corresponde al PEEK (no reforzado), la viruta presenta bordes continuos, perfectamente definidos y no se aprecian grietas significativas. En cambio, en el caso b), correspondiente al PEEK CF30, las fibras de refuerzo convierten al conjunto de la viruta mucho más frágil, poniéndose de manifiesto en las numerosas grietas que aparecen, en particular en el borde de tracción (borde exterior de la viruta). La progresión de estas grietas es sin duda mucho más acusada cuando se utiliza el rompe virutas, llegado a la ruptura frecuente, de modo que se fragmenta en pedazos muy pequeños.

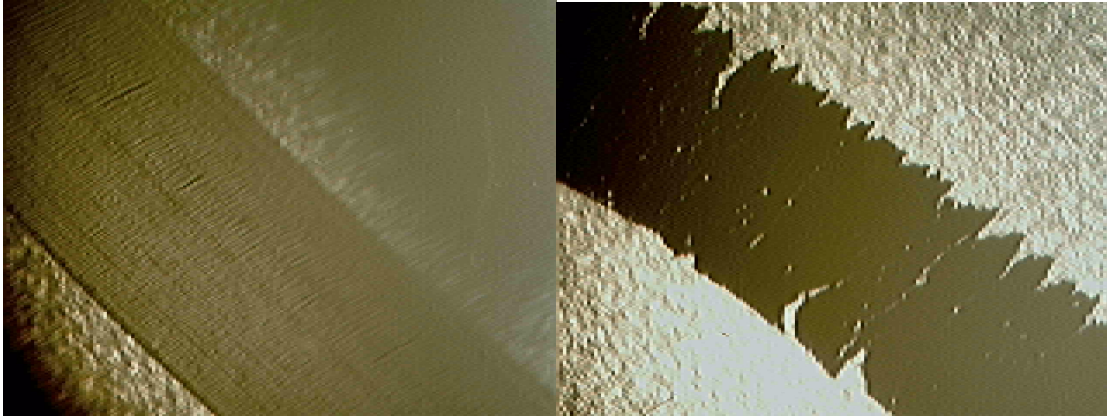


Figura 6.48 – Efecto de las fibras de refuerzo en la morfología de la viruta (3x):  
a) PEEK, b) PEEK CF30

### 6.7. Productividad de la herramienta

A partir de los parámetros funcionales del proceso de corte, se podría calcular la tasa o velocidad de remoción del material (en inglés “material removal rate” o MRR), de acuerdo con la siguiente ecuación (Groover, 1996):

$$MRR = V_c \cdot V_a \cdot P \quad (6.1)$$

Donde MRR se expresa en  $\text{mm}^3/\text{s}$ .

Sin embargo, dado que no todos los ensayos se han realizado con las mismas condiciones de corte ( $V_c$ ,  $V_a$ ,  $P$ ) y carecería de sentido físico sumar tasas de remoción correspondientes a ensayos diferentes, se va a calcular directamente el volumen de material removido (VMR) ( $\text{mm}^3$ ) de la siguiente forma:

$$VMR = L \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot \pi \quad (6.2)$$

Siendo  $L$ ,  $R_2$  y  $R_1$  las magnitudes geométricas que se indican en la Figura 6.49

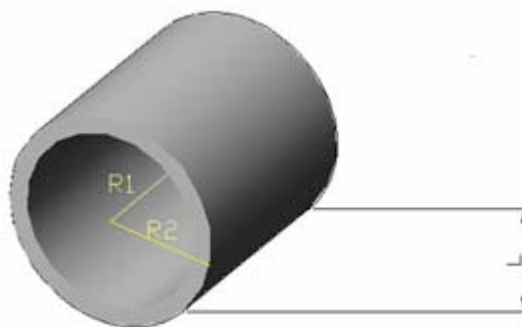


Figura 6.49 – Parámetros geométricos para el cálculo del volumen de material removido

El conocimiento del volumen total de material mecanizado con una determinada pastilla da idea de su productividad, teniendo en cuenta que ha habido un control de calidad riguroso para declarar la herramienta útil o desechable (desgaste intolerable para continuar trabajando en condiciones óptimas).

En el caso de la herramienta de diamante policristalino (PCD), no aparecieron signos de desgaste en las continuas observaciones al microscopio óptico (después de cada ensayo, una observación), por lo que sólo se utilizó una herramienta.

Sin embargo, en el caso de las herramientas de carburos cementados (K10), fue necesario sustituir la herramienta en varias ocasiones, además de utilizar las dos caras de que cada herramienta está dotada.

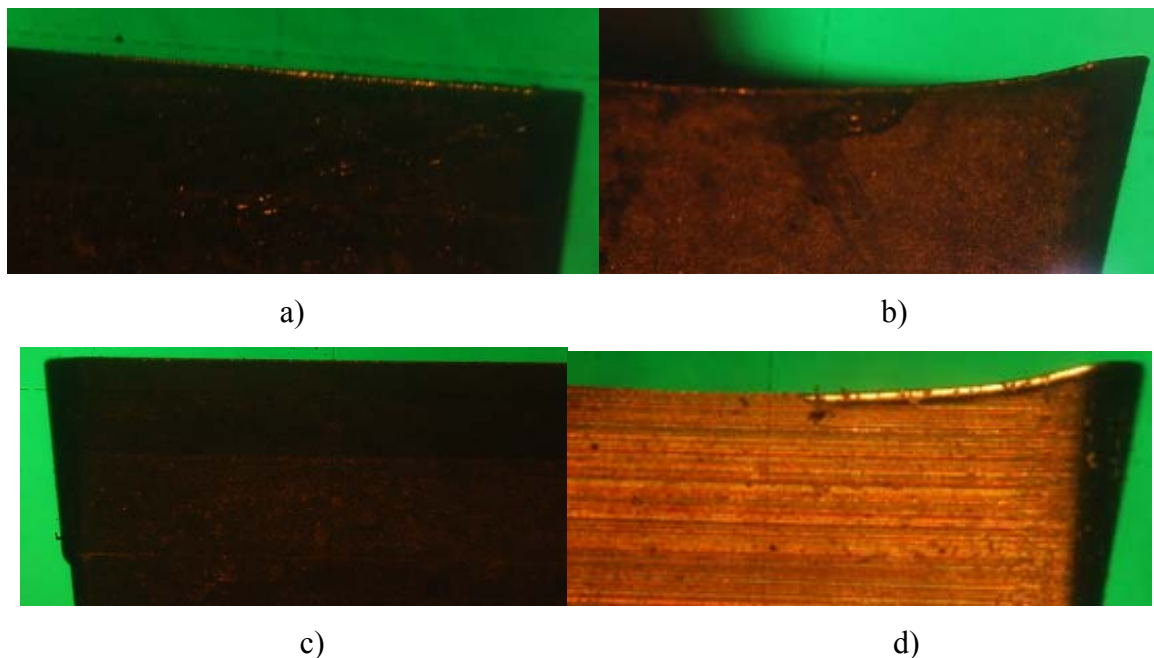
La Tabla 6.3 refleja los resultados del cálculo del volumen de material removido (Ec. 6.5), teniendo en cuenta los 5 materiales ensayados, las condiciones de corte utilizadas ( $V_c$ ,  $V_a$ ,  $P$ ), el diámetro inicial de las probetas, la longitud de pista ( $L$ ) y la repetición de los ensayos.

Tabla 6.3 – Volumen de material removido por cada herramienta (PCD, K10)

Herramienta	Pastilla	Cara	VMR (mm <sup>3</sup> )
PCD	1	1	1.096.479
K10	2	C1	122.634
		C2	108.295
	3	C3	113.581
		C4	98.446
	4	C5	102.308
		C6	106.760
	5	C7	115.609
		C8	110.327
		C9	109.353
		C10	109.166

La Figura 6.50 muestra diferentes fotografías en las que se pueden observar los filos de las herramientas de corte. En el caso de las herramientas de diamante (c) y d)) no hay desgaste significativo; tan sólo es de resaltar la presencia de restos de material adherido en la

pastilla de PCD. En las herramientas de carburos cementados existe ligero desgaste, aunque cuantitativamente muy pequeño. Las medidas de desgaste se han realizado siguiendo el procedimiento que marca la Norma ISO 3685 (véase sección 3.4.4.).



*Figura 6.50 – Observación del desgaste de las herramientas (30x):  
a) K10, b) H10, c) PCD, d) CVD*

La Figura 6.51 representa el desgaste de la herramienta ( $V_B$ ) en función del volumen de material removido (VMR). Es obvio que a medida que aumente el VMR debe aumentar también el desgaste; ahora bien, el propósito de la Figura es mostrar el comportamiento diferente de las herramientas K10 y PCD. Mientras que con una sola pastilla de PCD se pudieron realizar todos los ensayos previstos sin desgaste significativo, fue preciso utilizar 5 pastillas de K10, según ha quedado de manifiesto en la Tabla 6.3, para proseguir los ensayos en condiciones asumibles de desgaste. En otras palabras, la herramienta PCD removió diez veces más material que cada herramienta K10 y llegó a desgastarse menos de treinta veces. La evolución apuntada anteriormente solamente sería posible evidenciarla si se hubiesen realizado ensayos de larga duración.

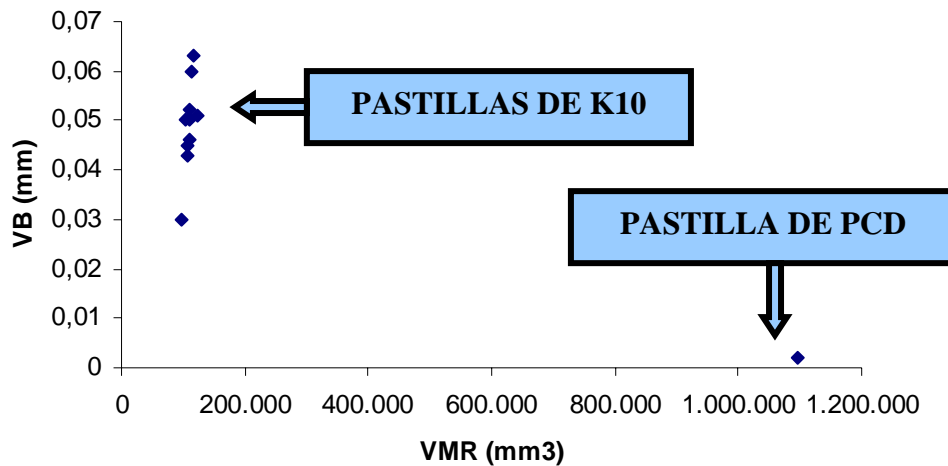


Figura 6.51 – Representación  $V_B$  Vs  $VMR$  para las herramientas K10 y PCD

### 6.8. Propuesta de índice de maquinabilidad

Tal y como se explicó en el Capítulo 2, no existe un índice de maquinabilidad universal, en particular en el caso de los materiales compuestos. La rugosidad y la fuerza específica de corte son dos criterios importantes para evaluar la maquinabilidad de un material compuesto (Bernardos *et al*, 2003; Mata y Davim, 2003; Davim y Mata, 2004). Sobre la base de estos dos parámetros, se propone un nuevo índice de maquinabilidad (IM) definido mediante la siguiente ecuación (Davim y Mata, 2004 y 2007-a):

$$IM = \left( \frac{1}{K_s} x \alpha \right) x \left( \frac{1}{Ra} x \beta \right) x 10^3 \quad (6.3)$$

Siendo,  $K_s$  la fuerza específica de corte ( $N/mm^2$ ),  $Ra$  la rugosidad (mm),  $\alpha$  ( $N/mm^2$ ) y  $\beta$  (mm) dos coeficientes de ponderación.

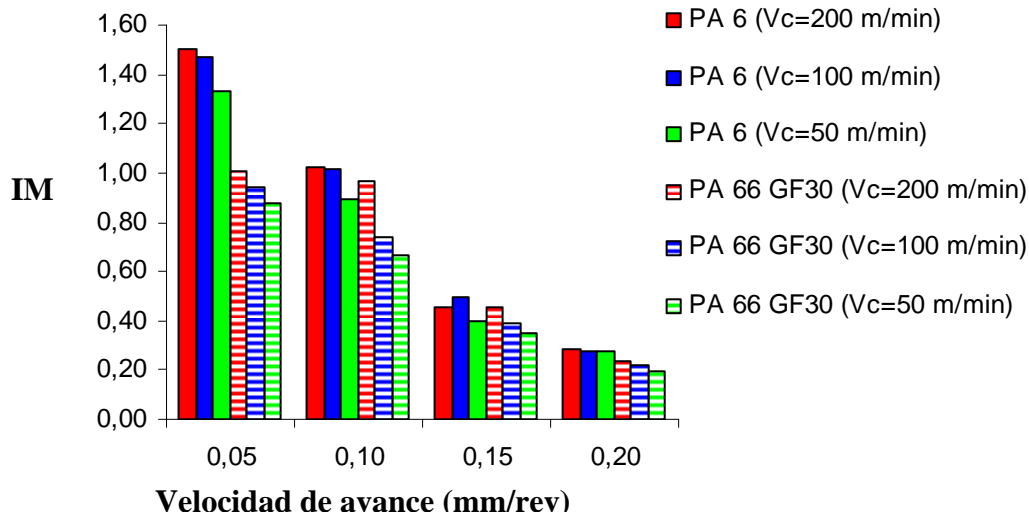
Se trata de recoger en un solo valor un indicador de la maquinabilidad que tenga en cuenta dos de los criterios de maquinabilidad utilizados en esta discusión y que permita establecer comparaciones entre materiales, considerando factores como la herramienta o los parámetros funcionales de corte, en particular la velocidad de corte y la velocidad de avance.

Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  se han obtenido para proporcionar una contribución similar tanto para  $K_s$  como para  $Ra$  en el valor de IM. El cociente entre la fuerza específica media ( $K_s^*$ ) y la rugosidad superficial media ( $Ra^*$ ) permite calcular  $\alpha = 173$  y  $\beta = 1$ , para los resultados de este estudio.

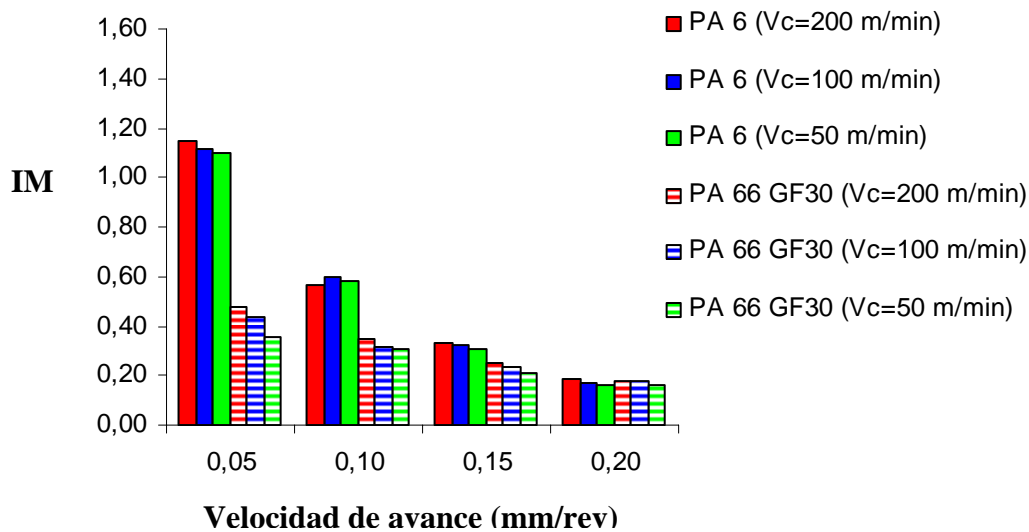


### 6.8.1. Poliamidas

La Figura 6.52 muestra la variación del índice de maquinabilidad en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte.



a)



b)

Figura 6.52 - Índice de maquinabilidad (IM) en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte: a)PCD, b) K10

Como se puede observar, la influencia de la velocidad de avance es mucho más significativa que la de la velocidad de corte en el valor del índice de maquinabilidad. El índice de maquinabilidad máximo (condiciones de corte óptimas), para los dos materiales, se consigue para la velocidad de avance más baja ( $V_a = 0.05$  mm/rev). La presencia de las

fibras de refuerzo en la poliamida PA 66-GF30 se traduce en una reducción del índice de maquinabilidad, aunque este efecto es más significativo para velocidades de avance por debajo de 0.1 mm/rev.

Como se puede apreciar, cuando se utiliza la herramienta K10 se obtienen índices de maquinabilidad más bajos en comparación con la herramienta PCD, en coherencia con todo lo comentado anteriormente en este Capítulo.

La Figura 6.53 presenta una comparación del índice de maquinabilidad para los dos tipos de herramientas utilizadas para una velocidad de corte particular.

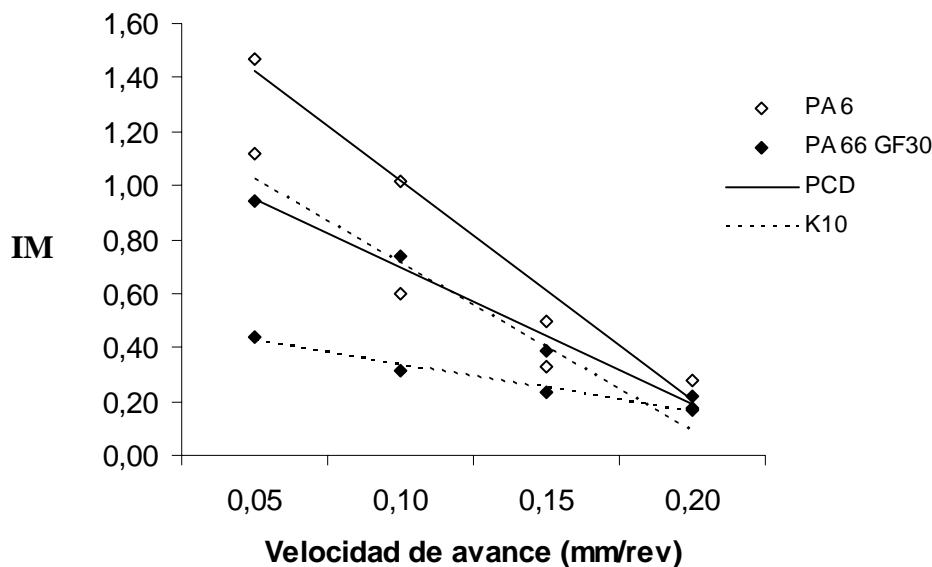
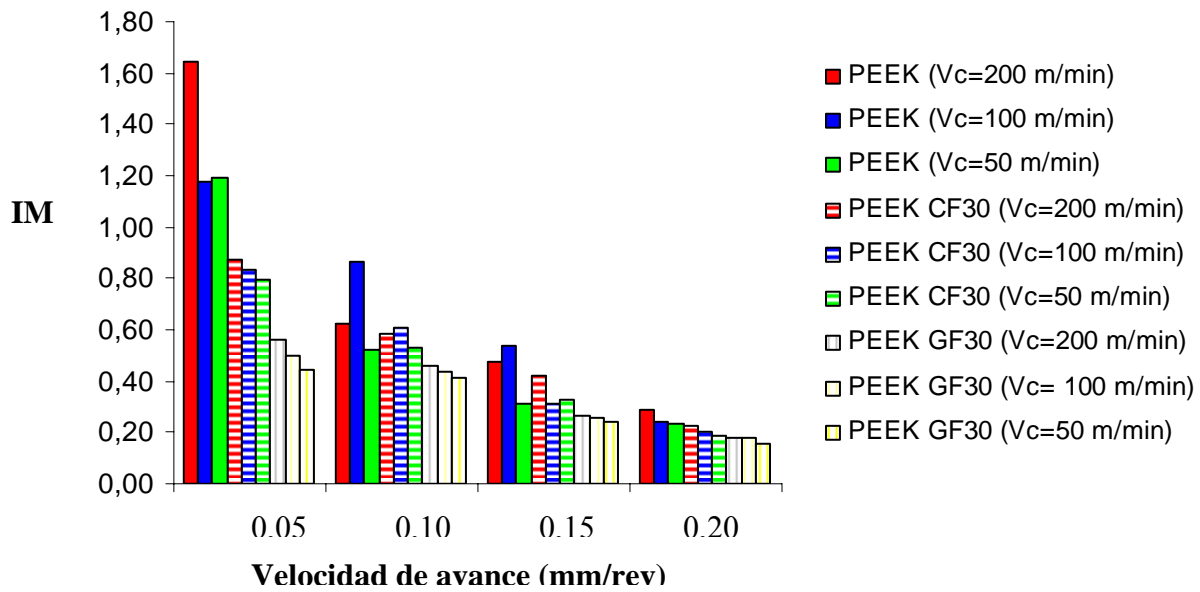


Figura 6.53- Comparativa del IM para PCD y K10 en función de la velocidad de avance para  $V_c=200$  m/min

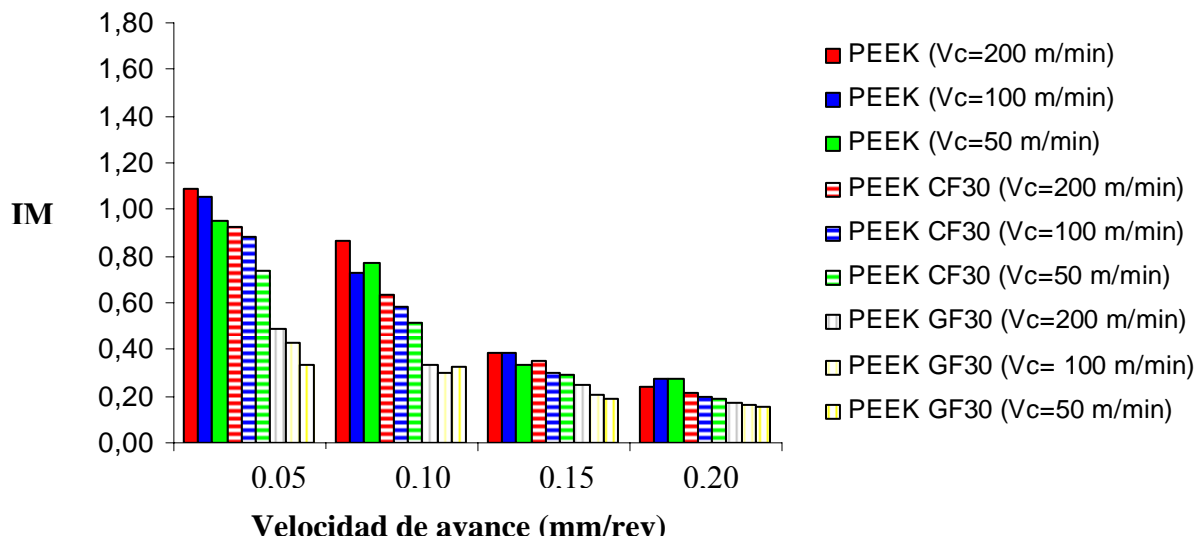
Se puede observar cómo para velocidades de avance cada vez mayores, el índice de maquinabilidad tiende a igualarse y a reducirse considerablemente.

### 6.8.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

La Figura 6.54 muestra la variación del índice de maquinabilidad en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte.



a)



b)

Figura 6.54 - Índice de maquinabilidad (IM) en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte: a)PCD, b) K10

En sintonía con el caso anterior, la influencia de la velocidad de avance es mucho más significativa que la de la velocidad de corte en el valor del índice de maquinabilidad. El índice de maquinabilidad máximo se consigue para la velocidad de avance más baja ( $V_a =$

0.05 mm/rev). La presencia de las fibras de refuerzo reduce el índice de maquinabilidad, especialmente en el caso del material PEEK GF30.

Como se puede apreciar, cuando se utiliza la herramienta K10 se obtienen índices de maquinabilidad más bajos en comparación con la herramienta PCD, en coherencia con todo lo comentado anteriormente en este Capítulo.

La Figura 6.55 presenta una comparación del índice de maquinabilidad para los dos tipos de herramientas utilizadas para una velocidad de corte particular

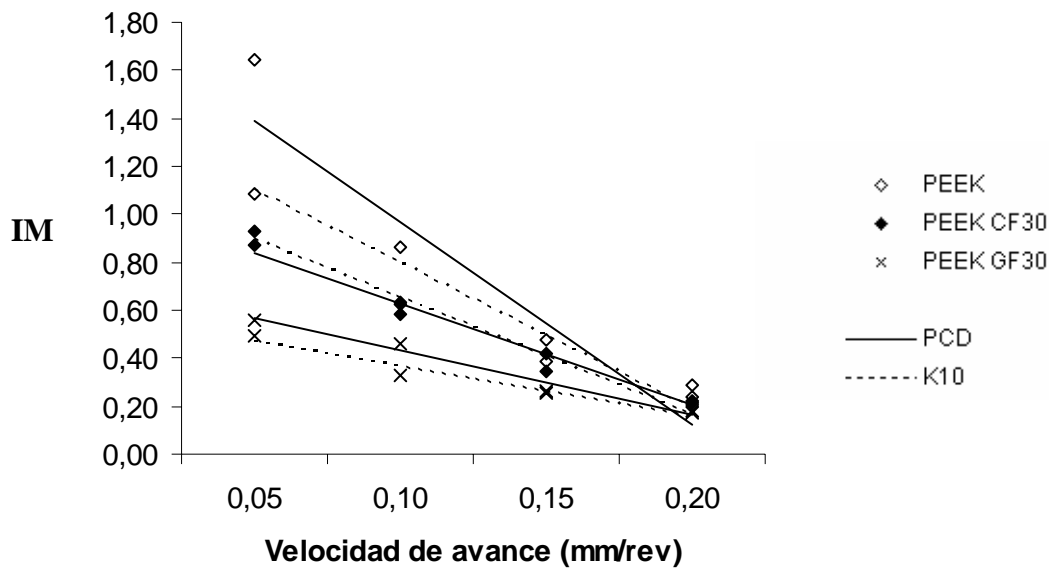


Figura 6.55 - Comparativa del IM para PCD y K10 en función de la velocidad de avance para  $V_c=200$  m/min

Se puede observar cómo para velocidades de avance cada vez mayores, el índice de maquinabilidad tiende a igualarse y a reducirse considerablemente.

### 6.9. Discusión de resultados

A lo largo de los epígrafes anteriores, se han presentado los resultados y han quedado de manifiesto una serie conclusiones que pasamos a resumir a continuación.

En primer lugar, se ha verificado el efecto de las fibras de refuerzo en los dos grupos de materiales. La presencia de las fibras se traduce en mayores valores de las fuerzas de corte (fuerza de mecanizado, potencia de corte y fuerza específica de corte) y de la rugosidad ( $R_a$  y  $R_t$ ). Este hecho es particularmente importante, ya que el mecanizado resulta más

difícil, requiere mayor consumo de energía y el acabado es generalmente peor. Por tanto, los materiales reforzados presentan una peor maquinabilidad en comparación con los termoplásticos sin refuerzo, PA 6 y PEEK. En el caso de las poli (éter-éter-cetonas), el PEEK GF30, reforzado con fibras de vidrio, es el material que evidencia una peor maquinabilidad.

Respecto de la influencia de la herramienta de corte, se puede aportar lo siguiente. Cuando se comparan los resultados obtenidos con la herramienta de diamante policristalino (PCD) y la de carburo cementado (K10), los mejores resultados corresponden a la primera, ya que permite mecanizar, con independencia del material de la pieza, con menores fuerzas de corte y conseguir un acabado superficial de mayor calidad (menor rugosidad y mayor precisión dimensional). Cuando se analiza el efecto del rompe virutas, se demuestra cómo tiene en general un efecto positivo, ya que reduce significativamente las fuerzas de corte, si bien no consigue igualar los acabados superficiales de las herramientas convencionales (PCD y K10). No obstante, es previsible una notable mejoría en los resultados de rugosidad si se mecanizase a velocidades de corte aún más altas, en cuyo caso podrían igualar o superar la calidad obtenida con las herramientas convencionales. Es importante destacar que la herramienta revestida de diamante (CVD) permite trabajar con resultados semejantes a la herramienta PCD y con un coste significativamente menor, lo cual hace esperar una exitosa introducción de este tipo de herramientas en el mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica. Por lo demás, el efecto del rompe virutas, tanto en la herramienta CVD como en la H10, se traduce en virutas más cerradas, lo que favorece su fractura.

En lo que respecta a la influencia de las condiciones de corte (parámetros funcionales de corte), se ha demostrado que la variación de la velocidad de avance, dentro de los valores seleccionados, afecta más a los resultados (fuerzas de corte, acabado superficial) que la variación de la velocidad de corte. A medida que aumenta la velocidad de avance, aumentan las fuerzas de corte y la rugosidad de las superficies mecanizadas, obteniéndose, por tanto, resultados peores. La profundidad de pasada tiene un efecto semejante al de la velocidad de avance, afectando especialmente a la fuerza de mecanizado y a la potencia de corte.

Respecto del índice de maquinabilidad, se ha propuesto una ecuación que permite determinar un valor de referencia en función de la rugosidad media y de la fuerza

específica de corte y puede servir para comparar la maquinabilidad de estos materiales. En concreto, se obtienen índices de maquinabilidad mayores para los materiales no reforzados, circunstancia que ya habíamos podido comprobar con los análisis previos de fuerzas de corte y rugosidad. Por otra parte, se obtiene un índice medio de maquinabilidad mayor al utilizar la herramienta PCD frente a la K10.

Finalmente, se ha puesto de manifiesto cómo la herramienta de diamante policristalino (PCD) ha permitido realizar todos los ensayos sin aparición de signos de desgaste, en tanto que ha sido necesario utilizar varias pastillas de K10.

Sin duda, los resultados presentados en este Capítulo vienen a confirmar algunas ideas presentadas en los Capítulos anteriores y han permitido poner de manifiesto la aptitud para el mecanizado de estos materiales. Se pueden, pues, mecanizar los materiales compuestos de matriz termoplástica y existen unas condiciones de corte que permiten optimizar el proceso.

# **Capítulo 7**

## **7. Síntesis, conclusiones y desarrollos futuros**

**7.1. Síntesis de los trabajos desarrollados**

**7.2. Conclusiones generales**

**7.3. Perspectivas para futuros trabajos de investigación**

# Capítulo 7

## **7. Síntesis, conclusiones y desarrollos futuros**

### **7.1. Síntesis de los trabajos desarrollados**

El trabajo que sirvió de base a esta tesis doctoral se planteó con el objetivo fundamental de estudiar la maquinabilidad de los materiales compuestos de matriz polimérica termoplástica.

Antes de iniciar este estudio fue necesario ejecutar una búsqueda exhaustiva de bibliografía para, por una parte, identificar el estado del arte del mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica y, por otra, efectuar una selección adecuada de los materiales a ensayar y las herramientas a utilizar. En concreto, se seleccionaron cinco materiales, dos pertenecientes a la familia de las poliamidas (PA 6 y PA 66-GF30) y tres a



la familia de las poli (éter-éter-cetonas) (PEEK, PEEK CF30 Y PEEK GF30). Se utilizaron herramientas de diamante policristalino (PCD), carburos cementados (K10 y H10) y herramientas revestidas de diamante (CVD).

Se realizaron ensayos preliminares con materiales compuestos de matriz termoestable, cuyos resultados no se presentan en este trabajo, que permitieron adquirir el conocimiento y la experiencia suficiente para abordar el núcleo central del trabajo.

Una vez seleccionados los parámetros funcionales del proceso de corte y definido el plan experimental, se prepararon las probetas y se procedió a la realización de ensayos de torneado con monitorización de las fuerzas de corte. Concluidos los ensayos de torneado, se efectuaron medidas de rugosidad y de espesores de viruta, que sirvieron para el análisis subsiguiente.

Posteriormente, se desarrolló un tratamiento estadístico de los datos obtenidos y se realizaron cálculos para determinar ciertas variables relevantes a partir de los valores experimentales.

Se han realizado comparaciones, en lo que respecta al análisis de la maquinabilidad y a la definición de los modelos de corte, entre los materiales no reforzados y los materiales reforzados, dentro de la familia de las poliamidas y de las poli (éter-éter-cetonas).

## **7.2. Conclusiones generales**

El análisis de los resultados obtenidos ha permitido llegar a una serie de conclusiones interesantes de cara a la caracterización del mecanizado de los materiales compuestos de matriz termoplástica.

La revisión bibliográfica ha permitido poner de manifiesto el potencial de aplicaciones de estos materiales en diferentes sectores productivos, gracias a su excelente y equilibrado conjunto de propiedades, y la necesidad en muchos casos de recurrir a operaciones de mecanizado para conferir a los componentes fabricados determinadas características dimensionales y de acabado. Se ha evidenciado que la investigación previa sobre el mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica ha estado centrada, básicamente, en los materiales de matriz termoestable, reforzados con fibras largas, por lo que es preciso aportar resultados y conclusiones acerca de la maquinabilidad de los materiales de matriz termoplástica, reforzados con fibras cortas. La presencia de este tipo

de fibras permite asimilar el comportamiento de estos materiales a un patrón homogéneo, que hace posible asumir la formación de viruta continua.

**- Modelo físico**

Con relación a la definición de los modelos físicos de corte, para las dos familias de materiales termoplásticos estudiadas, poliamidas y poli (éter-éter-cetonas), se ha podido establecer cómo la presencia de las fibras de refuerzo reduce el ángulo de corte, aumenta las tensiones, reduce las deformaciones de la viruta, aumenta los coeficientes de fricción y aleja sensiblemente los resultados del modelo teórico de Merchant. En este sentido, se ha demostrado cómo este modelo, inicialmente planteado para metales, sólo se ajusta, aunque con una excelente aproximación, a los materiales no reforzados PA 6 y PEEK, coincidiendo prácticamente modelo experimental con modelo teórico. Es posible, por tanto, aplicar los modelos de corte de los metales a los materiales poliméricos no reforzados, constituidos por una sola fase. Para los materiales reforzados es preciso introducir las oportunas correcciones (índice de Merchant corregido), de modo que también puedan servir como modelos de caracterización.

**- Modelo estadístico**

El análisis de varianza (ANOVA) ha permitido demostrar cómo en todas las variables estudiadas, excepto en la potencia de corte, la velocidad de avance es el parámetro funcional de corte que tiene una influencia más significativa, con porcentajes de contribución por encima del 80% en todos los casos. La influencia del material y de la herramienta en los resultados del análisis ANOVA es poco significativa en general.

Teniendo en cuenta los errores obtenidos, se puede concluir que los modelos desarrollados mediante la técnica de análisis de regresión lineal múltiple se pueden utilizar para predecir los valores con un razonable grado de aproximación, siempre y cuando las condiciones de corte seleccionadas pertenezcan al intervalo límite con el que se efectuaron los ensayos.

**- Análisis de la maquinabilidad**

Respecto del análisis experimental de la maquinabilidad, se ha verificado el efecto de las fibras de refuerzo en los dos grupos de materiales. La presencia de las fibras se traduce en mayores valores de las fuerzas de corte y de la rugosidad. Este hecho es particularmente

importante, ya que el mecanizado resulta más difícil, requiere mayor consumo de energía y el acabado es generalmente peor. Por tanto, los materiales reforzados presentan una peor maquinabilidad o aptitud para el mecanizado en comparación con los termoplásticos sin refuerzo, PA 6 y PEEK. En el caso de las poli (éter-éter-cetonas), el PEEK GF30, reforzado con fibras de vidrio, es el material que evidencia una peor maquinabilidad.

La herramienta de diamante policristalino (PCD) permite obtener los mejores resultados (menores fuerzas de corte y mejor acabado superficial), en comparación con la herramienta de carburo cementado. Cuando se analiza el efecto del rompe virutas, se demuestra cómo tiene en general un efecto positivo, ya que reduce significativamente las fuerzas de corte, si bien no consigue igualar los acabados superficiales de las herramientas convencionales (PCD y K10), debido, entre otras razones, al efecto del propio recubrimiento, que aumenta el radio de la arista de corte. No obstante, es previsible una notable mejoría en los resultados de rugosidad si se mecanizase a velocidades de corte aún más altas, en cuyo caso podrían igualar o superar la calidad obtenida con las herramientas convencionales. Es importante destacar que la herramienta revestida de diamante (CVD) permite trabajar con resultados semejantes a la herramienta PCD y con un coste significativamente menor.

En lo que respecta a la influencia de las condiciones de corte (parámetros funcionales de corte), se ha demostrado que la variación de la velocidad de avance, dentro de los valores seleccionados, afecta más a los resultados (fuerzas de corte, acabado superficial) que la variación de la velocidad de corte. A medida que aumenta la velocidad de avance, aumentan las fuerzas de corte y la rugosidad de las superficies mecanizadas, obteniéndose, por tanto, resultados peores. La profundidad de pasada tiene un efecto semejante al de la velocidad de avance, afectando especialmente a la fuerza de mecanizado y a la potencia de corte.

Se ha propuesto una ecuación que permite determinar un índice de maquinabilidad en función de la rugosidad media y de la fuerza específica de corte y puede servir para comparar la maquinabilidad de estos materiales. En concreto, se obtienen índices de maquinabilidad mayores para los materiales no reforzados. Por otra parte, se obtiene un índice medio de maquinabilidad mayor al utilizar la herramienta PCD frente a la K10.

Finalmente, se ha puesto de manifiesto cómo la herramienta de diamante policristalino (PCD) ha permitido realizar todos los ensayos sin aparición de signos de desgaste, en tanto que ha sido necesario utilizar varias pastillas de K10.

Como se ha podido comprobar, se han llegado a las mismas conclusiones acerca de los materiales, herramientas y parámetros funcionales de corte desde diferentes enfoques de análisis (estadístico, experimental).

En definitiva, se ha puesto de manifiesto la aptitud para el mecanizado de estos materiales. Se pueden, pues, mecanizar los materiales compuestos de matriz termoplástica y existen unas condiciones de corte que permiten optimizar el proceso.

Con las condiciones de corte y las herramientas utilizadas se pueden obtener superficies con valores de rugosidad adecuados para la construcción mecánica y, en muchos casos, para mecánica de precisión. Los resultados que se han presentado en esta tesis aportan información de interés práctico sobre las condiciones de corte y tipo de herramienta más apropiados.

### **7.3. Perspectivas para futuros trabajos de investigación**

Se ha realizado una investigación con aportaciones originales y con resultados transferibles a la industria. No obstante, teniendo en cuenta el trabajo desarrollado, los resultados obtenidos y los análisis realizados, nos planteamos profundizar en este estudio, de acuerdo con las líneas siguientes:

- Respecto del planteamiento experimental:
  - o Ampliar la matriz de condiciones (en particular velocidades de corte mayores), materiales y herramientas, para generalizar todavía más los resultados
  - o Realizar ensayos de micro torneado, interesante en un contexto de progresiva miniaturización de componentes y en el que se profundiza en el estudio de los materiales a escala nanométrica (nanotecnología)
  - o Realizar ensayos específicos de larga duración para verificar el desgaste de las herramientas
  - o Ensayar sistemas de refrigeración por aire para controlar la temperatura, especialmente si se trabaja con velocidades de corte más altas
  
- Respecto del análisis:
  - o Aplicar otras técnicas de análisis como algoritmos genéticos, RSM o redes neuronales

Por tanto, este trabajo de investigación, que arranca de una revisión profunda del “estado

del arte” en la materia, analizando todas las indagaciones y experiencias previas, amplía el espectro de interrogantes y deja abierta la puerta a nuevos trabajos, en especial a aquellos de desarrollo tecnológico transferible a las empresas del sector.

# Chapter 7

## **7. Synthesis, conclusions and future developments**

### **1. Synthesis of the developed works**

The investigation had as main with the objective of studying the machinability of the thermoplastic composite materials.

Before the beginning of this study an exhaustive search of bibliography was necessary for the following reasons: by one side, to identify the status-of-the-art of the machining of thermoplastic composite materials and by the other, to carry out an appropriated selection of the materials going to be tested and also the tools to use. To sum up five materials were selected, two from the family of the polyamides (PA 6 PA 66-GF30) and three from the

family of the poly (eter -eter- ketone) (PEEK, PEEK CF30 Y PEEK GF30). The used tools were cemented carbide (K10), polycrystalline diamond (PCD) and diamond coated (CVD). Once selected the functional parameters of the cutting process and defined the experimental plan, the test specimen was prepared and turning tests with monitoring of the cutting forces were made. After the turning tests, measures of roughness and chip took place, which values were used for the subsequent analysis.

Letter on, a statistical treatment of the collected data was developed and some calculations were made to determine certain outstanding variables from the experimental values.

Comparisons have been done concerning to the machinability analysis and the definition of the cutting models between the reinforced and unreinforced materials, within the polyamides and the poly (eter-eter-ketone) families.

## **2. General conclusions**

The analysis of the obtained results has allowed arriving at interesting conclusions facing to the characterization of the machining of thermoplastic composite materials.

The bibliographical revision has allowed showing the potential of applications of these materials in different productive sectors, due to their excellent and well balanced joint of properties, and the necessity in many cases of resorting to machining operations to provide the made components certain dimensional and finish characteristics.

It has been demonstrated that the previous investigation about the machining of polymeric composite materials has been centred in the materials with non thermoplastic matrix, reinforced with long fibres, reason why it is precise to contribute to results and conclusions about the machinability of the materials with a thermoplastic matrix, reinforced with short fibres. The presence of this type of fibres allows assimilating the behaviour of these materials to a homogenous pattern, which does possible to assume the formation of continuous chip.

### **- *Physical Model***

In relation with the definition of the physical cutting models, for the two studied families of thermoplastic materials, polyamides and poly (ether-ether-ketone), has been able to establish how the presence of reinforcement fibres reduces the cutting angle, increases the tensions, reduces the deformations of the chip, increases the coefficients of friction and

sensibly moves away the results of the theoretical model of Merchant. In this sense, it has been demonstrated how this model, initially raised for metals, only adjusts, although with an excellent approach, to unreinforced materials PA 6 and PEEK, practically agreeing experimental model with theoretical model. It is possible, therefore, to apply the cutting models used for metals to the unreinforced polymeric materials, constituted by a single phase. For the reinforced materials it is precise to make the opportune corrections (Merchant's corrected index), so that also they can serve as characterization models.

**- *Statistical model***

The variance analysis (ANOVA) has allowed to demonstrate how in all the variables studied, except in the cutting power, the feed rate is the cutting parameter that has more significant influence, with a percentage of contribution over 80% in all the cases. The influence of the material and the tool in the results of the ANOVA analysis is little significant in general.

Considering the obtained errors, it is possible to be concluded that the models developed by means of the technique of multiple linear regression analysis, can be used to predict the values with a reasonable degree of approach, as long as the selected cutting conditions belong at the interval limit with which the tests took place.

**- *Machinability analysis***

Respect to the experimental analysis of the machinability, the effect of reinforcement fibres in both groups of materials has been verified. The presence of fibres is translated in greater values of the cutting forces and the roughness. This fact is particularly important since the machining is more difficult, requires greater energy consumption and the finish is generally worse. Therefore, the reinforced materials present a worse machinability or aptitude for the machining in comparison with the thermoplastic ones without reinforcement, PA 6 and PEEK. In the case of poly (eter-eter-ketone); PEEK GF30, reinforced with glass fibres, is the material that demonstrates one worse machinability.

Polycrystalline diamond tool (PCD) allows to obtain the best results, (smaller cutting forces and better surface finish), in comparison with the cemented carbide tool. When analyzing the effect of the chip breaker , it is demonstrated that in general it has a positive effect, since it reduces the cutting forces significantly, although is not able to equal the



surface finishes of the conventional tools (PCD and K10), due, among other reasons to its own coating, which increases the radius of the cutting edge. However, a remarkable improvement in the roughness results is foreseeable if it were machining at higher cutting speeds, in which case could equal or surpass the quality obtained with the conventional tools. It is important to emphasize that the coated tool with diamond (CVD) allows working with similar results to the (PCD) tool and with a significantly lower cost. With regard to the influence of the cutting conditions, it has been demonstrated that the variation of the feed rate, within the selected values, affects the results (cutting forces, surface finish) more than the variation of the cutting speed. The more the feed rate increases, more they increase both the cutting forces and the roughness of the mechanized surfaces, obtaining, therefore, worse results. The depth of cut has a similar effect to the one of the feed rate affecting specially to the machining force and the cutting power.

An equation has been proposed, it allows to determine a machinability index based on the average roughness and the specific cutting force and it can be useful to compare the machinability of these materials. In particular, greater indexes of machinability are obtained for the unreinforced materials. On the other hand a greater average index of machinability is obtained when using PCD tool when compared to the K10.

Finally, it has been shown how polycrystalline diamond tool (PCD) has allowed making all the tests without appearance of wearing down signs, whereas it has been necessary to use several K10 inserts.

Since it has been possible to verify that the same conclusions about the materials, tools and functional cutting parameters have been reached from different analysis's point of view (statistical, experimental).

Really, the aptitude for the machining of these materials has been shown. The thermoplastic composite materials can, then, be mechanized and there are cutting conditions that allow the optimization of the process.

With the used tools and the cutting conditions, surfaces with suitable values of roughness for the mechanical construction can be obtained and also in many cases, for the precision mechanics. The results that have appeared in this thesis provide information of practical interest about the more appropriate cutting conditions and type of tool to use.

### **3. Perspective for future investigation**

An investigation with original contributions and transferable results to the industry has been made. However, considering the developed work, the obtained results and the made analyzes, we considered to deepen in this study, in agreement with the following lines:

- Respect to the experimental part:

- To extend the matrix of conditions (in particular greater cutting speeds), materials and tools, to generalize the results more again.
- To make micro-turning tests, interesting in a context of progressive miniaturization of components and in which it is deepened in the study of the materials at a nanometre scale (nanotechnology)
- To make specific long play test to verify the wear of the tools.
- To try systems of air cooling to control the temperature, especially when working with higher cutting speeds.

- Respect to the analysis

- To apply other analysis techniques, as genetic algorithms, RMS or neuronal networks.

Therefore, this work of investigation that started with a deep revision of the “status-of-the-art” in the matter, by analyzing all the previous investigations and experiences. Extend the joint of questions and leaves the door opened to new works, in special to those with a technological development transferable to the companies of the sector.

## Referencias bibliográficas

Abouelatta, O.B., Mádl, J., (2001), “Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, pp.269-277.

Abu Bakar, M. S., Cheng, M.H.W., Tang, S.M., Yu, S.C., Liao, K., Tan, C.T., Khor, K.A., Cheang, P., (2003), “Tensile properties, tension-tension fatigue and biological response of polyetheretherketone-hydroxyapatite composites for load-bearing orthopedic implants”, *Biomaterials*, Vol. 24, pp. 2245-2250.

Akay, M., O'Regan, D.F., Bailey, R.S., (1995), “Fracture toughness and impact behaviour of glass-fibre-reinforced polyamide 6,6 injection mouldings”, *Composites Science and Technology*, Vol. 55, pp. 109-118.

Alexis, J., (1995), “Practique industrielle de la méthode Taguchi, les plans d'expériences”, *AFNOR*, France, pp. 1-143.

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.

Antequera, P, Jiménez, L., Miravete, A., (1991), “Los materiales compuestos de fibra de vidrio”, *S.P. Universidad de Zaragoza*.

- Apichartpattanasiri, S., Hay, J.N., Kukureka, S.N., (2001), "A study of the tribological behaviour of polyamide 66 with varying injection-moulding parameters", *Wear*, Vol. 251, pp. 1557-1566.
- Aref, A.J., Alampalli, S., He, Y., (2005), "Performance of a fiber reinforced polymer web core skew bridge superstructure. Part I: Field testing and finite element simulations", *Composite Structures*, Vol. 69 (4), pp. 491-499.
- Arola, D., Ramulu, M., (1997), "Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: A finite element analysis", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 39, pp. 597-613.
- Arumugam, P.U., Malshe, A.P., Batzer, S.A., (2006), "Dry machining of aluminium silicon alloy using polished CVD diamond-coated cutting tools inserts", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, pp. 3399-3403.
- Bai, Q.S., Tao, Y.X., Bex, P., Zhang, G., (2004), "Study on wear mechanisms and grain effects of PCD tool in machining laminated flooring", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 22, pp. 111-115.
- Bernardos, P.G., Vosniakos, C.G., (2003), "Predicting surface roughness in machining: a review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 833-844.
- Bernasconi, A., Davoli, P., Basile, A., Filippi, A., (2007), "Effect of fibre orientation on the fatigue behaviour of a short glass fibre reinforced polyamide-6", *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 199-208.
- Bharat, B., (1999), "Principles and applications of tribology", *Wiley*, New York.
- Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N.K., (1995), "On the machining of fiber reinforce plastics (FRP) composite laminates", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No 5, pp. 701-716.
- Belmonte, M., Oliveira, F.J., Lanna, M.A., Silva, C.M., Corat, E.J., Silva, R.F., (2004), "Turning of CFRC composites using Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and thin CVD diamond coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tools", *Materials Science Forum*, Vol. 455-456, pp. 609-613.

- Bonifacio, M.E.R., Diniz, A.E., (1994), "Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools", *Wear*, Vol. 173 (1-2), pp. 137-144.
- Boothroy, G., Knight, W., (1989), "Fundamentals of Machining and Machine Tools", *Marcel Dekker*, New York, pp.121-124.
- Botelho, E.C., Figiel, L., Rezende, M.C., Lauke, B., (2003), "Mechanical behaviour of carbon fiber reinforced polyamide composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 1843-1855.
- Brezocnik, M., Kovacic, M., Ficko, M., (2004), "Prediction of surface roughness with genetic programming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157, pp. 28-34.
- Burris, D.L., Sawyer, W.G., (2007), "Tribological behaviour of PEEK components with compositionally graded PEEK/PTFE surfaces", *Wear*, Vol. 262, pp. 220-224.
- Byrne, G., Wunsch, U.E., (1986), "Composite materials in manufacturing engineering. Technical development and applications", *NBST*.
- Cabral, G., Reis, P., Polini, R., Titus, E., Ali, N., Davim, J.P., Grácio, J., (2006), "Cutting performance of time-modulated chemical vapour deposited diamond coated tool inserts during machining graphite", *Diamond and Related Materials*, Vol. 15 (10), pp. 1753-1758.
- Caprino, G., Tagliaferri, V., (1995), "Damage development in drilling glass-fiber-reinforced plastics", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35 (6), pp. 817-829.
- Caprino, G., Santo, L., Nele, L., (1998), "Interpretation of size effect in orthogonal machining of composite materials. Part I: Unidirectional glass-fibre-reinforced plastics", *Composites part A – Applied Science and Manufacturing*, Vol. 29 (8), pp.887-892.
- Cenna, A.A., Mathew, P., (1997), "Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastics. A review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37 (6), p.723-736.
- Ceretti, E., Lucchi, M., Altan, T., (1999), "FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 95 (1-3), pp. 17-26.

- Ceretti, E., Lazzaroni, C., Menegardo, L., et al., (2000), "Turning simulations using a three-dimensional FEM code", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98 (1), pp. 99-103.
- Chambers, A., Bishop, G., (1995), "The drilling of carbon fibre polymer matrix composites", *Processing and Manufacturing*, Vol. 3, pp. 565-572.
- 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.
- Chavarria, F., Paul, D.R., (2004), "Comparison of nanocomposites based on nylon 6 and nylon 66", *Polymer*, Vol. 45, pp. 8501-8515.
- Chen, Y.K., Modi, O.P., Mhay, A.S., Chrysanthou, A., O'Sullivan, J.M., (2003), "The effect of different metallic counterface materials and different surface treatments on the wear and friction of polyamide 66 and its composite in rolling-sliding contact", *Wear*, Vol. 255, pp. 714-721.
- Converse, G.L., Yue, W., Roeder, R.K., (2007), "Processing and tensile properties of hydroxyapatite-whisker-reinforced polyetheretherketone", *Biomaterials*, Vol. 28, pp. 927-935.
- Cogswell, F.N., (1992), "Thermoplastic aromatic polymer composites", *Butterworth-Heinemann Ltd.*, Boston.
- Davim, J.P., (1997), "Estudo da maquinabilidade dos compósitos de matriz de alumínio", Tese de doutoramento, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.
- Davim, J.P., Marques, N., (2001), "Evaluation of tribological properties of polymeric materials for hip prosthesis applications", *Tribology Letter*, Vol. 11, pp. 91-94.
- Davim, J.P., (2002), "Diamond tool performance in machining metal-matrix composites", *Journal of Material Processing Technology*, Vol 128, pp. 100-105.
- Davim, J.P., Reis, P., Lapa, V., Conceição António, C., (2003), "Machinability study on polyetheretherketone (PEEK) unreinforced and reinforced (GF30) for applications in structural components", *Composite Structures*, Vol. 62, pp. 67-73.

- Davim, J.P, Reis, P., (2004-a), “Dimensional precision and surface roughness on turning tubes in fibre reinforced plastics based on the design experiments”, *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol. 20 (4), pp. 268-279.
- Davim, J.P., Reis, P., (2004-b), “Machinability study on composite (polyetheretherketone reinforced with 30% glass fibre-PEEK GF 30) using polycrystalline diamond (PCD) and cemented carbide (K20) tools”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 23, pp. 412-418.
- Davim, J.P, Reis, P., Conceição António, C., (2004), “Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up”, *Composite Science and Technology*, Vol. 84, pp. 289-297.
- Davim, JP, Mata, F., (2004), “Influence of cutting parameters on surface roughness in turning glass-fibre-reinforced plastics using statistical analysis”, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 56 (5), pp. 270-274.
- Davim, JP, Mata, F., (2005-a), “Optimisation of surface roughness on turning fibre-reinforced plastics (FRPs) with diamond cutting tools”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26 (4), 319, 323.
- Davim, J.P., Mata, F., (2005-b), “A new machinability index in turning Fiber-Reinforced-Plastics”, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 170, pp.436-440.
- Davim, J.P., Cardoso, R., (2006), “Tribological behaviour of the composite PEEK-CF30 at dry sliding against steel using statistical techniques”, *Materials & Design*, Vol. 27, pp. 338-342.
- Davim, J.P., Mata, F., (2006), “Physical cutting model of polyetheretherketone composites”, *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 847-852.
- Davim, JP., Mata, F., (2007-a), “New machinability study of glass fibre reinforced plastics using polycrystalline diamond and cemented carbide (K15) tools”, *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1050-1058.
- Davim, JP, Mata, F. (2007-b), “A comparative evaluation of the turning of reinforced and unreinforced polyamide”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33 (9-10), pp. 911-914.

- De Almeida, A.J., (2001), “Introdução ao delineamento de experimentos”, *Edgard Blücher Ltda.*, Brasil.
- Dolinsek, S., Kopac, J., (1999), “Acoustic emission signals for tool wear identification”, *Wear*, Vol. 225, pp. 295-303.
- El Kadi, H., (2006), “Modeling the mechanical behavior of fiber-reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks –A review”, *Composite Structures*, Vol. 73 (1), pp. 1-23.
- 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.
- Ernst H., Merchant, M.E., (1941), “Chip Formation, Friction and High Quality Machined Surfaces”, *Trans. Am. Soc. Met.*, Vol. 29, pp. 299-378.
- Everstine, G.C., Rogers, T.G., (1971), “A Theory of Machining of Reinforced Materials”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 5 pp.94-106.
- Fan, J.P., Tsui, C.P., Tang, C.Y., Chow, C.L., (2004), “Influence of interphase layer on the overall elasto-plastic behaviours of HA/PEEK biocomposite”, *Biomaterials*, Vol. 25, pp. 5363-5373.
- Faure, C., Hänni, W., Schmutz, C.J., Gervanoni, M., (1999), “Diamond-coated tools”, *Diamond and Related Materials*, Vol. 8 (2-5), pp. 830-833.
- 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.
- Ferreira, J.R., Coppini, N.L., Levy Neto, F., (2001), “Characteristics of carbon-carbon composite turning”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, pp. 65-71.
- Figueiredo, M.A.V., Fernández, A.A., (1996), “O método de Taguchi no planeamento e análise de operações de soldadura”, *Ingenium-agosto/setembro*, pp. 79-85.



- Franke, R., Haase, I., Lehmann, D., Hupfer, B., Janke, A., (2007), "Manufacturing and tribological properties of sandwich materials with chemically bonded PTFE-PA 66 and PA 66/GF", *Wear*, Vol. 262, pp. 958-971.
- Fukui, H., Okida, J., Omori, N., Moriguchi, H., Tsuda, K., (2004), "Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminium alloys", *Surface Coatings and Technology*, Vol. 187, pp. 70-76.
- Ghidossi, P., El Mansori, M., Pierron, F., (2004), "Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, pp. 989-999.
- Gordon, S., Hillery, M.T., (2003), "A review of the cutting of composite materials", *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part L: J. Materials: Design and Applications*, pp. 35-45.
- Govindan Potti, P.K., Rao, B.N., Srivastava, V.K., (2000), "Notched tensile strength for long- and short-fiber reinforced polyamide", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 33, pp. 145-152.
- Goyal, R.K., Tiwari, A.N., Mulik, U.P., Negi, Y.S., (2007), "Effect of aluminium nitride on thermomechanical properties of high performance PEEK", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, pp. 516-524.
- Groover, M.P., (1996), "Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Process and Systems", *Prentice Hall International Editions*.
- Harsha, A.P., Tewari, U.S., (2003), "Two-body and three-body abrasive wear behaviour polyaryletherketone composites", *Polymer Testing*, Vol. 22, pp. 403-408.
- Heckele, M., Schomburg, W.K., (2004), "Review on micro molding of thermoplastic polymers", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14 (3), pp. 1-14
- 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.

- Jahanmir, S., Ramulu, M., Koshy, P., (1998), "Machining of ceramics and composites", *Marcel Dekker Inc.*, New York, pp.238-243.
- Jen, M.H.R., Tseng, Y.C., Lin, W.H., (2006), "Thermo-mechanical fatigue of centrally notched and unnotched AS-4/PEEK APC-2 composite laminates", *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp. 901-909.
- Jiang, Z., Zhang, Z., Friedrich, K., (2007), "Prediction on wear properties of polymer composites with artificial neural networks", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 168-176.
- Jordan, J., Jacob, K.I., Tannenbaum, R., Sharaf, M.A., Jasiuk, I., (2005), "Experimental trends in polymer nanocomposites – a review", *Materials Science and Engineering*, Vol. 393, pp. 1-11.
- Kalpakjian, S., Schmid, S.R., (2002), "Manufactura, ingeniería y tecnología", *Pearson Educación*, México.
- Kaneeda, T., (1991), "CFRP cutting mechanism", *Trans. American Manufacturing Research Institute of SME*, Vol. 19, pp. 216-221.
- Kaw, A., (1997), "Mechanics of composite materials", *CRC Press*.
- Kevin Chou, Y., Lui, J., (2005), "CVD diamond tool performance in metal matrix composite machining", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, pp. 1872-1878.
- Khondker, O.A., Ishiaku, U.S., Nakai, A., Hamada, H., (2006), "A novel processing technique for thermoplastic manufacturing of unidirectional composites reinforced with jute", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, pp. 2274-2284.
- Kim, D., Ramulu, M., Doan, X., (2005), "Influence of consolidation process on the drilling performance and machinability of PIXA-M and PEEK thermoplastic composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 18 (3), pp. 195-217.
- Kim, B.C., Park, D.C., Kim, H.S., Lee, D.G., (2006), "Development of composite spherical bearing", *Composite Structures*, Vol. 75, pp- 231-240.
- Komanduri, R., (1993), "Machining fiber-reinforced composites", *Mechanical Engineering.*, Vol. 115 (4), pp. 58-64.

- Kopac, J., Bahor, M., (1999), "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.
- Köpf, A., Feistritz, S., Udier, K., (2006), "Diamond coated cutting tools for machining of non-ferrous metals and fibre reinforced polymers", *International Journal Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 24, pp. 354-359.
- Koplev, A., (1980), "Cutting of CFRP with single edge tools", *3<sup>rd</sup> International Conference on composite Materials*, Paris.
- Koplev, A., Lystrup, A., Vorm, T., (1983), "The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP", *Composites*, Vol. 14 (4), pp. 371-376.
- Krishan, K.C., (1998), "Composite materials. Science and engineering", *Springer*.
- Krishnamurthy, R., Santhanakrishnan, G., Malhotra, S.K., (1992), "Machining of Polymeric composites", *Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium*, ASM Materials Week, Chicago, Illinois, pp. 139-148.
- Kukureka, S.N., Hooke, C.J., Rao, M., Liao, P., Chen, Y.K., (1999), "The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact", *Tribology International*, Vol. 32, pp. 107-116.
- Le Coustumer, P., Motelica-Heino, M., Chapon, P., François, H., Payling, R., (2003), "Surface characterization and depth profile analysis of glasses by r.f. GDOES", *Surface and Interface Analysis*, Vol. 35 (7), pp. 623-629.
- Lee, B.Y., Tarn, 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.
- Lee, S.M., Park, D.C., Kim, B.C., Lee, D.G., (2006), "Strength of functionally gradient composite hemispherical bearings", *Composite Structures*, Vol. 74, pp. 145-152.
- Lu, Z., Yoneyama, T., (1999), "Micro cutting in the micro lathe turning system", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, pp. 1171-1183.

- Mahdi, M., Zhang, L., (2001-a), "An adaptive three-dimensional finite element algorithm for the orthogonal cutting of composite materials", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113 (1-3), pp. 368-372.
- Mahdi, M., Zhang, L., (2001-b) "A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 373-377.
- Mallick, V., (2001), "Thermoplastic composite based processing technologies for high performance turbomachinery components", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing)*, Vol. 32, pp. 1167-1173.
- Mata, F., Davim, J.P., (2003), "An investigation about the precision turning fiber reinforced plastics (FRP's) with diamond cutting tools using multiple analysis regression", in *II Iberian Conference of Tribology*, España, pp. 107-112.
- Mata, F., Davim, J.P., (2004-a), "Turning of fiber reinforced plastics: experimental study of the evolution of the cutting forces and workpiece surface roughness", *VIII Congreso Nacional de Materiales*, España.
- Mata, F., Davim, J.P., (2004-b), "A new machinability index in machining glass fiber reinforced plastics", *XVI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, España.
- Mata, F., Davim, J.P., (2005-a), "Machining of PEEK composites using polycrystalline diamond tools", *VI National Conference of composite materials*, España, pp. 321-328
- Mata, F., Davim, J.P., (2005-b), "Physical cutting model of reinforced PEEK (CF-30) using polycrystalline diamond and cemented carbide tools", *III Congreso Ibérico de Tribología, 9ª Jornadas Portuguesas de tribologia*, Portugal.
- Mata, F., Davim, J.P., (2005-c), "Physical cutting model of polyamide composites", *XII Portuguese Materials Society Meeting and III International Materials Symposium*, Portugal.
- Mata, F., Davim, J.P., (2006), "Experimental study of surface quality in machining of polyamide composite materials", *IX Congreso Nacional de materiales*, España.
- Mata, F., Reis, P., Davim, J.P., (2006), "Physical cutting model of polyamide composites

(PA66 GF30)", *Material Science Forum*, Vol. 514-516, pp. 643-647.

Mata, F., Davim, J.P., (2007-a), "Diamond tool performance in machining thermoplastic composite PEEK CF30", *Congreso Ibérico de Tribología*, España.

Mata, F., Davim, J.P., (2007-b), "Performance of chemical vapour deposition (CVD) diamond coated tools in turning reinforced polyamide (PA 66-GF30)", *Materiais 2007*, Portugal

Mathew, J., Ramakrishnan, N., Naik, N.K., (1999-a), "Investigations into the effect of geometry of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 91 (1), p.1-11.

Mathew, J., Ramakrishnan, N., Naik, N.K., (1999-b), "Trepanning on unidirectional composites: delamination studies", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing)*, Vol. 30 (8), p.951-959.

Merchant, M., (1945), "Mechanics of the metal cutting process. II: Plasticity conditions in orthogonal cutting", *Journal of Applied Physics*, Vol. 16, pp. 318-324.

Micheletti, G.F., (1977), "Tecnologia meccanica", *UTET*, Italia.

Miravete, A., Larrodé, E., Castejón, L., Clemente, R., et al., (2000), "Materiales compuestos" (Tomos I y II), *Ed. A.M.*

Montgomery, D.C., (2001), "Design and analysis of experiments", *Jhon and Sons*, New York.

Moore, D.S., (1998), "Estadística aplicada básica", *Ed. Antoni Bosch*, España.

Núñez, P.J., Simao, J., Arenas, J.M., De la Cruz, C., (2006), "Surface roughness characterisation using cutting force analysis, regression and neural network prediction models", *Material Science Forum*, Vol. 526, pp. 211-216.

Olsen, R.H., Dewes, R.C., Aspinwall, D.K., (2004), "Machining of electrically conductive CVD diamond tool blanks using EDM", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 149, pp. 627-632.

- Ozden, S., Charayev, A.M., Shaon, A.H., (1999), “The synthesis of polyetheretherketones and investigations of their properties”, *Journal of Material Science*, Vol. 34, pp. 2741-2744.
- Palabiyik, M., Bahadur, S., (2002), “Tribological studies of polyamide 6 and high-density polyethylene blends filled with PTFE and copper oxide and reinforced with short glass fibers”, *Wear*, Vol. 253, pp. 269-376.
- Palanikumar, K., Karunamoorthy, L., Karthikeyan, R., (2004), “Optimizing the machining parameters for minimum surface roughness in turning of GFRP composites using design of experiments”, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 20 (4), pp. 373–378.
- Palanikumar K, (2006), “Cutting parameters optimization for surface roughness in machining of GFRP composites using Taguchi's method”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 25 (16): 1739-1751.
- Palanikumar K, Karunamoorthy L, Karthikeyan R., (2006-a), “Parametric optimization to minimize the surface roughness on the machining of GFRP composites”, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 22 (1), pp. 66-72.
- Palanikumar K, Karunamoorthy L, Manoharan N., (2006-b), “Mathematical model to predict the surface roughness on the machining of glass fiber reinforced polymer composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 25 (4), pp. 407-419.
- Palanikumar K, Karunamoorthy L, Karthikeyan R., (2006-c), “Multiple performance optimization of machining parameters on the machining of GFRP composites using carbide (K10) tool”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 21 (8), pp. 846-852.
- Palanikumar K, Karunamoorthy L, Karthikeyan R, et al., (2006-d), “Optimization of machining parameters in turning GFRP composites using a carbide (K10) tool based on the Taguchi method with fuzzy logics”, *Metals and Materials International*, Vol. 12 (6), pp. 483-491.
- Park, D.C., Lee, S.M., Kim, B.C., Kim, H.S., Lee, D.G., (2006), “Development of heavy duty hybrid carbon-phenolic hemispherical bearings”, *Composite Structures*, Vol. 73, pp. 88-98.

- Pedroso, A.G., Mei, L.H.I., Agnelli, J.A.M., Rosa, D.S., (2002), "The influence of the drying process time on the final properties of recycled glass fiber reinforced polyamide 6", *Polymer Testing*, Vol. 21, pp. 229-232.
- Peña, D., (1994), "Estadística. Modelos y métodos", Ed. Alianza Universidad Textos, España.
- Pérez, C., (2002), "Estadística aplicada a través de Excel", Ed. Prentice Hall, España.
- Persson, U., (1999), "A fibre-optic surface-roughness sensor", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 95, pp. 107-111.
- Petropoulos, G., Pandazaras, C., (2003), "Evaluating the real profile length in turning of carbon steels", *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 55, No 3, pp. 128-136.
- Petropoulos, G., Davim, JP., Mata, F., Pandazaras, C., (2006-a), "New considerations of evaluating the anisotropy of machined surfaces", *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 12, N 1, pp. 1-6.
- Petropoulos, G.P., Pandazaras, C.N., Vaxevanidis, N.M., Antoniadis, A. (2006-b), "Multi-parameter identification and control of turned surface textures", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29 (1-2), pp. 118-128.
- Petropoulos, G., Mata, F., Davim, JP. (2008), "Statistical study of surface roughness in turning of Peeks", *Materials and Design*, Vol. 29 (1), pp. 218-223.
- Picard, Y.N., Adams, D.P., Vasile, M.J., Ritchey, M.B., (2003), "Focused ion beam-shaped microtools for ultra-precision machining of cylindrical components", *Precision Engineering*, Vol. 27, pp. 59-69.
- Rae, P.J., Brown, E.N., Orler, E.B., (2007), "The mechanical properties of poly(ether-ether-ketone) (PEEK) with emphasis on the large compressive strain response", *Polymer*, Vol. 48 (2), pp. 598-615.
- Rahman, M., Ramakrishna, S., Prakash, J.R.S., Tan, D.C.G., (1999-a), "Machinability study of carbon fiber reinforced composite", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89-90, pp.292-297.

- Rahman, M., Ramakrisna, S., Thoo, H.C., (1999-b), "Machinability study of carbon/PEEK composites", *Machin. Science Technology*, Vol. 3, pp. 49-59.
- Ramesh, M., Seetharamu, K., Ganesan, N., Sivakumar, M., (1998), "Analysis of machining of FRPs using FEM", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, pp. 1531-1549.
- Ramulu, M., Wern, C.W., Garbini, J.L., (1993), "Effect of the direction on surface roughness measurements of machined graphite /epoxy composite", *Composites Manufacturing*, Vol. 4 No 1, pp.39-51.
- Ramulu, M., Arola, D., Colligan, K., (1994), "Preliminary Investigation of Effects on the Surface Integrity of Fiber Reinforced Plastics", *PD-Vol-64-2. Engineering Systems Design and Analysis 2 ASME*, pp.93-101.
- Ramulu, M., Kim, D., Choi, G., (2003), "Frequency analysis and characterization in orthogonal cutting of glass fiber reinforced composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing)*, Vol. 183, pp. 949-962.
- Ramulu, M., Kuo, S.-Y., Chen, Y.-M., Kim, D., Spitsen, R., (2004), "Cutting characteristics of preform and SMC composites", *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, Vol. 32, pp. 239-246.
- Ravindra, H.V., Srinivasa, Y.G., Krishnamurthy, R., (1993-a), "Tool wear monitoring in turning using a pattern-recognition technique", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37 (1-4), pp. 731-740.
- Ravindra, H.V., Srinivasa, Y.G., Krishnamurthy, R., (1993-b), "Modeling of tool wear based on cutting forces in turning", *Wear*, Vol. 169 (1), pp. 25-32.
- Reineck, I., Sjöstrand, M.E., Karner, J., Pedrazzini, M., (1996), "Diamond coated cutting tools", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 14, pp. 187-193.
- Ribeiro, M.V., Coppini, N.L., (1999), "An applied database system for the optimisation of cutting conditions and tool selection", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 92-93, pp. 371-374.



- Risbood, K.A., Dixit, U.S., Sahasrabudhe, A.D., (2003), "Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132 (1), pp. 203-214.
- Rodriguez, C., Ortiz, I.M., (1999), "Diseño óptimo de experimentos por modelos de regresión", *Ed. Universidad de Almería*, España.
- Ross, P.J., (1996), "Taguchi techniques for quality engineering, loss function", *McGraw Hill*, New York, pp. 43-151.
- Sakuma, K., Seto, M., (1983), "Tool wear in cutting glass-fiber-reinforced plastics. The relation between fiber orientation and tool wear", *Bulletin of the JSME*, Vol. 26 (218), pp. 1420-1427.
- Sang-Olk, A., Eun-Sang, L., Sang-Lay, N., (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, No 1, pp. 60-67.
- Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R., Malhotra, S.K., (1988), "Machinability Characteristics of Fibre Reinforced Plastics Composites", *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 17 pp.195-204.
- Sardinas, R.Q., Reis, P., Davim, J.P., (2006), "Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms", *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 3083-3088.
- Scheaffer, R.L., McClave, J.T., (1993), "Probabilidad y estadística para ingeniería", *Grupo Editorial Iberoamericana*, México.
- Shaw, M.C., (1984), "Metal Cutting Principles", *Oxford Science Publications*, New York, pp. 18-46.
- Sheikh-Ahmad, J.Y., Stewart, J.S., Feld, H., (2003), "Failure characteristics of diamond-coated carbides in machining wood-based composites", *Wear*, Vol. 255 (2003), pp. 1433-1437.
- Shet, C., Deng, X., (2000), "Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105 (1), pp.95-109.
- Sierra, R., (1994), "Análisis estadístico multivariable", *Ed. Paraninfo*, España.

- Sinmazcelik, T., Yilmaz, T., (2007), "Thermal aging effects on mechanical and tribological performance of PEEK and short fiber reinforced PEEK composites", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 641-648.
- Spencer, A., (1972), "Deformations of fibre-reinforced materials", *Clarendon Press*, Oxford.
- Spur, G., Wunsch, U.E., (1988), "Turning of Fiber-Reinforced Plastics", *Manuf. Rev.*, Vol. 1 (2), pp. 124-129.
- 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.
- Sreejith, P.S., Krishnamurthy, R., Malhotra, S.K., (2007), "Effect of specific cutting pressure and temperature during machining of carbon/phenolic ablative composite using PCBN", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, pp. 88-95.
- Stanley, W.F., Mallon, P.J., (2006), "Intraply shear characterisation of a fibre reinforced thermoplastic composite", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, pp. 939-948.
- Sussmann, R.S., Brandon, J.R., Coe, S.E., Pickles, C.S.J., Sweeney, C.G., Wasenczuk, A., Wort, C.J.H., Dodge, C.N., (1998), "CVD diamond: va new engineering material for thermal, dielectric and optical applications", *Ind. Diamond Rev.* Vol.,3, pp. 69-77.
- Takeyama, H., Iijima, N., (1988), "Machinability of glass fiber reinforced plastics and applications of ultrasonic machining", *Annals CIRP*, Vol. 37, pp. 93-96.
- Tjong, S.C., Xu, S.-A., KwokYiu Li, R., Mai, Y.-W, (2002), "Short glass fiber-reinforced polyamide 6,6 composites toughened with maleated SEBS", *Composites Science and Technology* , Vol 62 (15), pp. 2017-2027.
- Turchetta, S., Carrino, L., Polini, W., (2005), "CVD diamond insert in stone cutting", *Diamond and Related Materials*, Vol. 14, pp. 641-645.
- 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.

- Verrey, J., Wakeman, M.D., Michaud, V., Manson, J.A.E., (2006), "Manufacturing cost comparison of thermoplastic and thermoset RTM for an automotive floor pan", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, pp. 9-22.
- Voss, H., Friedrich, K., (1987), "On the wear behaviour of short-fibre-reinforced PEEK composites", *Wear*, Vol. 116, pp. 1-18.
- Wang, X.M., Zhang, L.C., (1995-a), "Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, pp. 1623-1638.
- Wang, X.M., Zhang, L.C., (1995-b), "Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, pp. 1639-1648.
- Wang, X.M., Zhang, L.C., (2003), "An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fiber reinforced plastics", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 1015-1022.
- 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.
- Young, H.T., Chou, T.L., (1994), "Modeling of tool/chip interface temperature distribution in metal cutting", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 36 (10), pp. 931-943.
- Young, H.T., Mathew, P., Oxley, P.L.B., (1994), "Predicting cutting forces in face milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36 (6), pp. 771-783.
- Zhang, Z., Friedrich, K., (2003), "Artificial neural networks applied to polymer composites: a review", *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 2029-2044.
- Zhang, Z., Breidt, C., Chang, L., Friedrich, K., (2004), "Wear of PEEK composites related to their mechanical performances", *Tribology International*, Vol. 37, pp. 271-277.
-

Tabla A.1. - Valores de fuerzas de corte y espesores de viruta en función de los parámetros de corte: PCD en Poliamidas

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Espesor (mm) (·)		F <sub>c</sub> (N) (*)		F <sub>a</sub> (N) (*)		F <sub>p</sub> (N) (*)	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	0.07	0.06	25.07	31.9	11.11	15.36	2.31	3.17
2	200	0.10	0.134	0.129	44.94	40.75	11.57	15.17	2.59	2.85
3	200	0.15	0.190	0.177	71.91	71.38	13.37	16.47	3.29	3.27
4	200	0.20	0.25	0.225	80.02	92.00	13.96	17.63	3.46	3.55
5	100	0.05	0.076	0.07	24.42	32.19	11.87	16.13	2.64	2.41
6	100	0.10	0.143	0.139	44.37	53.33	12.60	18.50	2.96	2.92
7	100	0.15	0.207	0.199	62.84	75.62	13.76	20.86	3.34	3.40
8	100	0.20	0.267	0.248	78.99	97.29	15.12	22.99	3.89	3.84
9	50	0.05	0.078	0.07	25.91	33.56	12.89	17.84	2.51	2.72
10	50	0.10	0.149	0.141	45.50	55.15	13.69	22.22	2.82	3.45
11	50	0.15	0.212	0.26	72.68	78.03	15.56	26.00	3.74	4.17
12	50	0.20	0.278	0.26	81.14	101.31	16.31	30.45	3.76	5.34

· Media de 6 medidas

\* Media de dos medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla A.2. - Valores de fuerzas de corte y espesores de viruta en función de los parámetros de corte: K10 en Poliamidas

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Espesor (mm) (·)		F <sub>c</sub> (N) (*)		F <sub>a</sub> (N) (*)		F <sub>p</sub> (N) (*)	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	0.07	0.07	34.71	38.87	15.77	24.63	3.94	5.06
2	200	0.10	0.134	0.135	52.92	66.97	17.13	30.17	3.52	6.34
3	200	0.15	0.195	0.199	73.88	87.03	19.13	34.17	3.44	7.72
4	200	0.20	0.25	0.27	94.57	111.20	20.84	37.00	3.83	8.71
5	100	0.05	0.075	0.07	32.20	39.99	14.92	31.29	2.35	6.32
6	100	0.10	0.144	0.138	54.04	66.82	19.08	40.63	2.83	8.31
7	100	0.15	0.211	0.20	78.04	89.64	23.40	44.97	3.51	9.76
8	100	0.20	0.274	0.26	100.76	110.72	26.56	48.08	4.20	11.04
9	50	0.05	0.083	0.07	31.62	66.10	14.15	58.77	2.27	14.74
10	50	0.10	0.144	0.134	53.94	78.61	19.43	76.22	2.98	19.72
11	50	0.15	0.215	0.195	78.92	97.23	25.50	60.26	4.43	13.66
12	50	0.20	0.286	0.266	103.42	115.48	31.38	60.65	5.26	13.62

· Media de 6 medidas

\* Media de dos medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla A.3. - Valores de fuerzas de corte y espesores de viruta en función de los parámetros de corte: PCD en Poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Espesor (mm) (·)			F <sub>c</sub> (N) (*)			F <sub>a</sub> (N) (*)			F <sub>p</sub> (N) (*)		
			PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30
1	200	0.05	0.07	0.07	0.088	37.44	33.11	40.22	20.62	22.7	33.23	2.66	3.63	7.67
2	200	0.10	0.131	0.118	0.155	50.26	58	68.13	20.76	28.35	36.89	2.41	5.14	7.94
3	200	0.15	0.186	0.170	0.225	87.59	77.77	91.44	19.84	31.96	39.88	4.86	6.24	9.09
4	200	0.20	0.24	0.200	0.290	115.7	94.5	112.23	21.63	34.57	42.48	5.25	7.48	9.89
5	100	0.05	0.07	0.067	0.088	39.29	53.71	41.76	18.14	33.52	50.92	4.09	6.60	16.96
6	100	0.10	0.129	0.131	0.160	66.14	65.33	68.06	21.42	40.1	40.92	3.63	8.43	11.14
7	100	0.15	0.20	0.196	0.230	02.51	84.17	90.69	24.88	44.41	44.71	4.01	9.76	11.69
8	100	0.20	0.266	0.234	0.292	118.82	100.43	111.68	28.48	47.93	46.72	4.99	11.14	11.85
9	50	0.05	0.07	0.07	0.088	35.65	37.17	45.40	17.21	45.41	31.49	2.36	8.89	7.09
10	50	0.10	0.126	0.135	0.156	62.36	60.80	71.19	18.76	51.52	34.26	2.77	10.46	7.96
11	50	0.15	0.212	0.200	0.230	94.62	82.59	94.33	28.71	55.98	38.56	4.23	11.84	9.00
12	50	0.20	0.278	0.223	0.304	124.24	99.02	116.39	36.48	59.78	41.32	6.12	12.76	10.17

· Media de 6 medidas

\* Media de dos medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla A.4. - Valores de fuerzas de corte y espesores de viruta en función de los parámetros de corte: K10 en Poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Espesor (mm) (·)			F <sub>c</sub> (N) (*)			F <sub>a</sub> (N) (*)			F <sub>p</sub> (N) (*)		
			PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30
1	200	0.05	0.073	0.076	0.088	35.06	39.34	45.69	22.35	23.67	34.65	3.01	3.87	7.28
2	200	0.10	0.136	0.138	0.147	61.23	56.23	72.47	23.76	31.26	39.82	2.80	5.22	8.09
3	200	0.15	0.197	0.18	0.229	85.22	90.42	103.68	21.08	34.97	42.01	5.82	6.57	10.35
4	200	0.20	0.23	0.179	0.292	99.37	123.45	134.58	24.65	36.91	43.86	6.91	7.86	11.32
5	100	0.05	0.071	0.074	0.09	54.78	45.89	56.89	18.34	37.01	51.98	4.69	6.98	17.08
6	100	0.10	0.132	0.137	0.163	64.78	71.34	72.01	25.54	43.86	43.81	4.07	9.03	12.19
7	100	0.15	0.195	0.190	0.234	87.40	117.38	104.76	27.29	48.03	45.67	4.59	10.52	12.54
8	100	0.20	0.250	0.206	0.297	103.67	124.68	102.45	32.05	52.07	44.81	5.02	11.63	13.04
9	50	0.05	0.073	0.072	0.093	39.58	38.50	46.80	19.72	49.12	42.78	2.61	9.75	7.98
10	50	0.10	0.141	0.138	0.164	57.90	68.21	91.02	21.69	51.98	50.89	3.81	11.39	11.05
11	50	0.15	0.197	0.202	0.245	84.59	103.79	110.86	34.97	57.91	56.72	4.57	12.06	12.86
12	50	0.20	0.234	0.247	0.31	104.67	141.67	132.40	39.40	64.02	73.89	6.83	12.78	13.92

· Media de 6 medidas

\* Media de dos medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla A.5. - Valores de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ) (Ecs 4.1. 4.2. 4.3) y del ángulo de corte ( $\Phi$ ) (Ec. 4.4)

Tests	PA 6				PA 66			
	PCD		K10		PCD		K10	
	$R_c$	$\Phi$	$R_c$	$\Phi$	$R_c$	$\Phi$	$R_c$	$\Phi$
1	1.50	33.69	1.45	34.59	1.41	35.34	1.58	32.33
2	1.35	36.52	1.35	36.52	1.30	37.56	1.37	36.12
3	1.31	37.35	1.27	38.21	1.19	40.04	1.36	36.32
4	1.28	37.99	1.25	39.57	1.13	41.50	1.33	36.93
5	1.53	33.16	1.56	32.66	1.47	34.22	1.56	32.66
6	1.45	34.59	1.44	34.77	1.41	35.34	1.39	35.73
7	1.41	35.34	1.39	35.73	1.34	36.73	1.36	36.32
8	1.37	36.12	1.34	36.73	1.24	38.88	1.34	36.73
9	1.69	30.61	1.59	32.16	1.47	34.22	1.56	32.66
10	1.46	34.40	1.50	33.69	1.42	35.15	1.36	36.32
11	1.44	34.77	1.42	35.15	1.35	36.52	1.33	36.93
12	1.43	34.96	1.39	35.73	1.22	39.34	1.31	37.35

Tabla A.6. - Valores de la tensión normal ( $\sigma$ ) (Ec. 4.4), tensión tangencial ( $\tau$ ) (Ec. 4.5) y deformación de la viruta ( $\varepsilon$ ) (Ec. 4.6)

Tests	PA 6						PA 66					
	PCD			K10			PCD			K10		
	$\sigma$	$\tau$	$\varepsilon$	$\sigma$	$\tau$	$\varepsilon$	$\sigma$	$\tau$	$\varepsilon$	$\sigma$	$\tau$	$\varepsilon$
1	124.40	101.61	2.16	183.26	113.95	2.13	178.17	83.17	2.21	251.30	103.05	2.11
2	106.70	71.29	2.09	136.04	97.18	2.09	109.53	87.77	2.09	199.33	106.81	2.06
3	105.95	95.27	2.07	122.22	95.93	2.05	118.51	99.26	2.09	177.35	96.38	2.03
4	89.43	95.53	2.06	115.43	95.42	2.05	115.56	83.90	2.08	168.82	97.83	2.01
5	127.60	101.29	2.18	168.03	104.90	2.20	170.45	77.93	2.20	277.54	88.77	2.15
6	106.59	95.78	2.13	133.00	96.49	2.13	131.37	84.52	2.10	209.75	90.57	2.11
7	96.02	96.42	2.11	124.68	97.29	2.10	119.73	84.43	2.09	179.93	90.20	2.08
8	89.11	96.50	2.09	119.75	97.36	2.08	115.12	81.42	2.08	168.64	88.33	2.04
9	136.76	102.73	2.28	146.94	103.96	2.21	179.06	81.81	2.20	473.23	136.88	2.15
10	113.62	93.85	2.14	132.71	95.67	2.16	137.76	85.40	2.09	312.82	59.28	2.12
11	113.13	94.34	2.13	126.22	96.23	2.12	127.87	98.29	2.08	212.27	84.42	2.09
12	94.80	94.57	2.12	122.35	96.14	2.10	123.08	83.23	2.07	191.32	81.01	2.03

Tabla A.7. - Valores del ángulo de fricción ( $\rho$ ) y del coeficiente de fricción ( $\mu$ )(Ec.4.8)

Tests	PA 6				PA 66			
	PCD		K10		PCD		K10	
	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$
1	23.90	0.44	24.43	0.45	25.71	0.48	32.36	0.63
2	14.43	0.25	17.93	0.32	20.41	0.37	24.25	0.45
3	10.54	0.18	14.51	0.25	12.99	0.23	21.43	0.39
4	9.89	0.17	12.42	0.22	10.84	0.19	18.40	0.33
5	25.92	0.48	24.86	0.46	26.61	0.50	38.04	0.78
6	15.85	0.28	19.44	0.35	19.13	0.34	31.30	0.60
7	12.35	0.21	16.69	0.29	15.42	0.27	26.64	0.50
8	10.84	0.19	14.76	0.26	13.29	0.23	23.47	0.43
9	26.44	0.49	24.10	0.44	27.99	0.53	39.64	0.82
10	16.74	0.30	19.80	0.36	22.04	0.40	44.11	0.96
11	12.08	0.21	17.90	0.32	18.42	0.33	31.78	0.61
12	11.36	0.20	16.87	0.30	16.72	0.30	27.70	0.52



Tabla A.8. - Valores del ángulo de Merchant ( $\Phi_M$ ) (Ec. 4.8), constante de Merchant ( $\delta$ ) y ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ) (Ec. 4.10)

Tests	PA 6						PA 66					
	PCD			K10			PCD			K10		
	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$
1	32.78	91.81	32.06	32.14	94.89	32.16	28.81	103.04	35.85	33.04	88.56	31.51
2	36.03	90.97	35.31	34.79	93.45	34.81	32.87	99.37	39.90	37.78	86.67	36.24
3	37.74	89.21	37.02	38.50	89.41	38.52	34.28	101.51	41.31	39.72	83.18	38.19
4	38.78	88.40	38.06	39.57	89.98	39.60	35.79	101.40	42.83	40.05	83.75	38.51
5	32.56	91.18	31.85	31.69	91.93	31.71	25.97	106.48	33.01	32.03	91.24	30.50
6	35.27	88.62	34.55	35.43	88.67	35.45	29.34	101.98	36.38	37.07	87.31	35.53
7	36.65	87.37	35.93	37.28	86.88	37.31	31.67	100.10	38.71	38.82	84.99	37.28
8	37.61	87.00	36.89	38.35	86.75	38.37	33.26	101.23	40.29	39.57	84.30	38.04
9	32.94	85.32	32.22	31.00	92.31	31.02	25.17	108.08	32.21	31.77	91.76	30.24
10	35.09	88.60	34.37	33.97	89.42	34.00	22.94	114.41	29.97	36.62	89.38	35.09
11	36.04	87.44	35.32	35.78	88.72	35.81	29.10	104.82	36.14	38.95	85.94	37.42
12	36.54	86.79	35.84	36.63	88.18	36.66	31.14	106.38	38.18	39.31	86.06	37.78

Tabla A.9. - Valores de la relación inversa de espesores ( $R_c$ ) (Ecs 4.1. 4.2. 4.3) y del ángulo de corte ( $\Phi$ ) (Ec. 4.4)

Tests	PEEK				CF30				GF30			
	PCD		K10		PCD		K10		PCD		K10	
	$R_c$	$\Phi$	$R_c$	$\Phi$	$R_c$	$\Phi$	$R_c$	$\Phi$	$R_c$	$\Phi$	$R_c$	$\Phi$
1	1.44	34.77	1.50	33.69	1.43	34.96	1.55	32.82	1.80	29.05	1.81	28.92
2	1.32	37.14	1.37	36.12	1.19	40.04	1.40	35.53	1.56	32.66	1.48	34.04
3	1.25	38.65	1.32	37.14	1.14	41.25	1.22	39.34	1.51	33.51	1.54	32.99
4	1.21	39.57	1.17	40.52	1.10	44.00	1.01	44.71	1.46	34.40	1.47	34.22
5	1.43	34.96	1.50	33.69	1.38	35.92	1.52	33.34	1.80	29.05	1.84	28.52
6	1.35	36.52	1.33	36.93	1.32	37.14	1.38	35.92	1.61	31.84	1.64	31.37
7	1.33	36.93	1.31	37.35	1.31	37.35	1.27	38.21	1.54	32.99	1.57	32.49
8	1.30	37.56	1.25	38.65	1.17	40.52	1.03	44.15	1.47	34.22	1.49	33.86
9	1.44	34.77	1.49	33.86	1.42	35.15	1.46	34.40	1.80	29.05	1.90	27.75
10	1.42	35.15	1.42	35.15	1.37	36.12	1.39	35.73	1.58	32.33	1.65	31.21
11	1.39	35.73	1.32	37.14	1.34	36.73	1.36	36.32	1.54	32.99	1.64	31.37
12	1.27	38.21	1.17	40.52	1.12	41.76	1.35	36.52	1.53	33.16	1.56	32.66

Tabla A.10. - Valores de la tensión normal ( $\sigma$ ) (Ec. 4.4), tensión tangencial ( $\tau$ ) (Ec. 4.5) y deformación de la viruta ( $\epsilon$ ) (Ec. 4.6)

Tests	PEEK						CF30						GF30					
	PCD			K10			PCD			K10			PCD			K10		
	$\sigma$	$\tau$	$\epsilon$	$\sigma$	$\tau$	$\epsilon$	$\sigma$	$\tau$	$\epsilon$	$\sigma$	$\tau$	$\epsilon$	$\sigma$	$\tau$	$\epsilon$	$\sigma$	$\tau$	$\epsilon$
1	156.78	63.46	2.36	170.62	98.86	2.35	223.61	116.73	2.16	222.83	110.53	2.13	241.67	102.4	2.19	243.54	116.6	2.12
2	134.95	78.82	2.15	138.97	95.01	2.20	169.96	118.25	2.09	143.00	83.95	2.07	230.65	84.14	2.11	212.94	110.2	2.03
3	107.98	79.34	2.18	127.21	88.81	2.17	141.15	118.11	2.07	147.14	117.39	2.05	221.28	75.75	2.03	186.57	105.4	2.01
4	100.04	76.61	2.15	134.24	84.10	2.14	125.55	118.81	2.02	144.66	120.69	2.03	226.20	61.89	2.00	184.43	97.55	2
5	154.61	110.12	2.38	189.24	97.25	2.35	349.80	115.07	2.16	218.57	127.49	2.12	251.55	111.8	2.17	309.17	84.72	2.10
6	126.02	90.35	2.24	159.59	94.86	2.23	184.46	114.27	2.08	170.05	121.44	2.09	254.51	78.58	2.10	222.79	91.60	2.07
7	109.98	84.51	2.20	141.75	89.36	2.18	152.27	116.42	2.07	152.18	118.96	2.08	233.26	70.95	2.05	183.89	91.91	2.07
8	103.13	80.21	2.16	138.09	85.38	2.15	134.40	116.42	2.05	145.44	117.74	2.06	240.92	55.44	2.00	177.94	87.75	2.02
9	219.67	85.23	2.42	196.49	123.83	2.35	225.84	119.77	2.16	200.59	113.29	2.13	264.42	124.2	2.14	371.69	64.47	2.12
10	148.52	89.27	2.25	162.21	102.85	2.21	166.02	116.01	2.12	149.00	116.85	2.12	295.47	102.3	2.10	248.85	80.78	2.09
11	120.91	88.21	2.24	154.73	95.52	2.18	141.27	116.33	2.07	153.96	117.96	2.10	225.94	80.96	2.09	203.26	84.53	2.08
12	108.61	82.86	2.20	160.45	88.14	2.18	121.98	114.90	2.02	163.99	116.64	2.05	202.89	78.36	2.09	204.35	78.65	2.01

Tabla A.11. - Valores del ángulo de fricción ( $\rho$ ) y del coeficiente de fricción ( $\mu$ )(Ec.4.8)

Tests	PEEK				CF30				GF30			
	PCD		K10		PCD		K10		PCD		K10	
	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$
1	21.92	0.40	28.84	0.55	29.44	0.56	34.20	0.67	28.84	0.55	45.10	1.00
2	13.48	0.23	22.44	0.41	22.59	0.41	34.42	0.68	20.80	0.38	32.45	0.63
3	9.98	0.17	12.76	0.22	19.26	0.35	31.76	0.61	17.57	0.31	27.14	0.51
4	7.96	0.14	10.58	0.18	17.12	0.30	29.98	0.57	15.72	0.28	24.20	0.44
5	25.00	0.46	24.78	0.46	28.75	0.54	32.68	0.64	29.30	0.56	43.47	0.94
6	17.46	0.31	17.94	0.32	30.50	0.58	36.91	0.75	21.65	0.39	32.06	0.62
7	13.24	0.23	15.05	0.26	26.09	0.48	34.86	0.69	18.41	0.33	27.97	0.53
8	11.21	0.19	13.44	0.23	23.22	0.42	32.88	0.64	16.51	0.29	24.94	0.46
9	24.77	0.46	25.76	0.48	45.00	1.00	30.43	0.58	32.83	0.64	40.27	0.84
10	19.27	0.34	16.74	0.30	35.89	0.72	35.15	0.70	24.08	0.44	29.40	0.56
11	15.92	0.28	16.87	0.30	30.68	0.59	33.96	0.67	20.31	0.37	25.02	0.46
12	13.87	0.24	16.36	0.29	27.18	0.51	32.35	0.63	18.27	0.33	22.65	0.41

Tabla A.12. - Valores del ángulo de Merchant ( $\Phi_M$ ) (Ec. 4.8), constante de Merchant ( $\delta$ ) y ángulo de Merchant corregido ( $\Phi_{Mc}$ ) (Ec. 4.10)

Tests	PEEK						CF30						GF30					
	PCD			K10			PCD			K10			PCD			K10		
	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$	$\Phi_M$	$\delta$	$\Phi_{Mc}$
1	34.03	89.30	33.85	30.57	98.38	31.47	30.27	99.36	38.18	27.89	99.84	36.71	30.57	86.68	28.20	22.44	103.20	25.16
2	38.25	85.72	38.07	33.77	96.72	34.67	33.70	102.67	41.60	27.78	105.48	36.60	34.59	88.88	32.22	28.77	97.77	31.48
3	40.00	84.26	39.82	38.61	90.06	39.51	35.36	101.76	43.26	29.11	110.44	37.93	36.21	83.55	33.84	31.42	94.16	34.14
4	41.01	89.00	40.83	39.70	89.72	40.6	36.43	107.12	44.34	30.00	119.40	38.82	37.13	84.16	34.76	32.89	93.00	35.61
5	32.49	92.38	32.31	32.60	94.70	33.50	25.62	110.59	33.52	28.65	99.36	37.47	30.34	86.34	27.97	23.26	101.57	25.97
6	36.26	91.32	36.08	36.02	90.98	36.92	29.74	104.78	37.64	26.54	108.75	35.35	34.17	84.39	31.80	28.96	95.74	31.68
7	38.37	87.94	38.19	37.47	88.91	38.36	31.95	100.79	39.85	27.56	111.28	36.38	35.79	83.39	33.42	31.01	93.95	33.72
8	39.39	88.51	39.20	38.27	88.56	39.17	33.38	104.26	41.28	28.55	121.18	37.37	36.74	84.23	34.37	32.52	93.38	35.24
9	32.61	92.49	32.42	32.11	95.30	33.01	22.49	115.30	30.39	29.78	99.23	38.59	28.58	88.33	26.21	24.86	98.37	27.58
10	35.36	89.57	35.17	36.62	87.04	37.52	27.05	108.13	34.95	27.42	106.61	36.23	32.95	86.50	30.58	30.29	94.06	33.01
11	37.03	90.20	36.85	36.56	88.33	37.45	29.65	104.14	37.55	28.01	106.60	36.83	34.84	83.05	32.47	32.48	91.00	35.20
12	38.06	94.91	37.88	36.81	92.78	37.71	31.40	110.70	39.3	28.82	105.39	37.63	35.86	83.59	33.49	33.67	88.97	36.39

Tabla B.1. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte:  
PCD en poliamidas

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)		$P_c$ (W)		$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	27.52	35.54	91.75	116.75	250.70	319.00
2	200	0.10	46.48	43.58	164.49	149.16	224.72	203.77
3	200	0.20	81.30	93.74	292.89	336.73	200.06	230.01
4	100	0.05	27.28	36.09	40.53	53.44	244.20	321.95
5	100	0.10	46.22	56.52	73.66	88.53	221.87	266.67
6	100	0.20	80.51	100.04	131.12	161.51	197.47	243.23
7	50	0.05	29.05	38.11	21.50	27.85	259.15	335.65
8	50	0.10	47.59	59.60	37.76	45.77	227.50	275.77
9	50	0.20	82.85	105.92	67.35	84.09	202.86	253.28

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla B.2. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte:  
K10 en poliamidas

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)		$P_c$ (W)		$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	38.33	46.29	127.05	142.26	347.15	388.70
2	200	0.10	55.73	73.72	193.68	245.11	264.60	334.85
3	200	0.20	96.92	117.51	346.14	406.99	236.43	278.00
4	100	0.05	35.57	51.16	53.46	66.38	322.05	379.90
5	100	0.10	57.37	78.64	89.70	110.90	270.20	334.10
6	100	0.20	104.29	121.21	167.27	183.79	251.91	276.80
7	50	0.05	34.72	89.67	26.24	54.86	316.25	361.00
8	50	0.10	57.41	111.26	44.77	65.25	269.70	320.07
9	50	0.20	108.20	131.14	85.83	95.84	258.55	288.70

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla B.3. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte:  
PCD en poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)			$P_c$ (W)			$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )		
			PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30
1	200	0.05	37.69	36.54	47.71	120.41	123.81	143.67	320	338.3	392.55
2	200	0.10	58.56	61.34	84.11	199.74	218.13	252.55	276	298	345.02
3	200	0.20	92.72	109.8	133.29	325.86	398.02	420.57	223.2	271.87	287.27
4	100	0.05	37.70	39.27	49.31	54.26	58.86	68.57	332	354.6	413.1
5	100	0.10	60.20	64.81	90.50	92.56	102.43	119.31	285	308.52	359.37
6	100	0.20	95.88	115.2	141.75	152.20	187.42	196.90	238	282.26	296.55
7	50	0.05	53.88	40.56	50.81	37.01	30.50	36.26	346.3	367.5	436.9
8	50	0.10	69.43	68.69	65.18	52.30	53.73	51.76	294.5	323.72	311.82
9	50	0.20	103.4	121	146.41	81.29	97.40	101.98	241.6	293.4	307.17

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla B.4. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte:  
K10 en poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)			$P_c$ (W)			$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )		
			PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30
1	200	0.05	42.82	46.32	47.53	121.18	137.03	147.20	331.1	374.4	402.2
2	200	0.10	54.43	73.97	69.19	212.28	183.95	249.35	290	251.3	340.65
3	200	0.20	117.8	117.67	114.07	345.87	423.46	410.76	236.25	289.25	280.57
4	100	0.05	43.46	53.95	75.92	54.96	62.15	66.78	337.1	392.9	417.6
5	100	0.10	69.61	79.44	77.88	96.28	83.43	113.09	326.65	330.7	340.3
6	100	0.20	122.2	122.04	121.39	156.87	192.66	186.30	251.07	297.05	279.2
7	50	0.05	39.65	64.82	69.22	27.48	31.07	33.38	371.7	356.5	454
8	50	0.10	65.17	88.49	70.24	48.14	41.71	56.54	304	311.8	355.95
9	50	0.20	129.6	131.40	137.77	78.43	96.03	93.15	247.55	310.6	290.97

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla B.5. - Valores de Ra y Rt en función de los parámetros de corte:  
PCD en poliamidas

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra*		Rt*	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	0.46	0.54	4.14	5.32
2	200	0.10	0.75	0.88	4.24	6.34
3	200	0.20	3.06	3.14	13.85	16.65
4	100	0.05	0.42	0.57	3.47	5.05
5	100	0.10	0.77	0.88	4.86	6.48
6	100	0.20	3.13	3.29	13.92	17.01
7	50	0.05	0.50	0.59	5.19	4.74
8	50	0.10	0.85	0.94	5.22	6.65
9	50	0.20	3.13	3.46	15.31	16.56

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla B.6. - Valores de Ra y Rt en función de los parámetros de corte:  
K10 en poliamidas

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra*		Rt*	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	0.51	0.94	3.95	10.05
2	200	0.10	1.16	1.50	5.57	10.88
3	200	0.20	3.96	3.54	16.20	21.66
4	100	0.05	0.48	0.99	3.93	10.02
5	100	0.10	1.07	1.63	5.20	11.76
6	100	0.20	4.03	3.55	16.98	21.35
7	50	0.05	0.46	1.05	4.41	11.01
8	50	0.10	1.10	1.44	5.52	11.35
9	50	0.20	4.21	3.63	18.14	22.23

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)



Tabla B.7. - Valores de Ra y Rt en función de los parámetros de corte:  
PCD en poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra *			Rt *		
			PEEK	CF30	GF30	PEEK	CF30	GF30
1	200	0.05	0.48	0.53	0.77	4.15	4.87	7.63
2	200	0.10	0.69	0.84	1.11	3.74	6.19	9.47
3	200	0.20	3.07	2.68	3.47	12.70	15.06	20.14
4	100	0.05	0.47	0.53	0.83	3.59	5.29	7.01
5	100	0.10	0.73	0.86	1.17	4.26	5.58	10.11
6	100	0.20	3.27	2.93	3.53	13.89	15.54	18.86
7	50	0.05	0.49	0.61	0.86	3.69	6.35	8.43
8	50	0.10	0.74	1.05	1.17	4.41	6.58	10.22
9	50	0.20	2.45	2.87	3.74	15.48	15.10	21.33

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla B.8. - Valores de Ra y Rt en función de los parámetros de corte:  
K10 en poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra *			Rt *		
			PEEK	CF30	GF30	PEEK	CF30	GF30
1	200	0.05	0.32	0.55	0.90	3.02	5.02	11.14
2	200	0.10	1.02	0.92	1.51	5.64	5.93	13.07
3	200	0.20	4.21	2.99	3.45	19.39	15.62	22.73
4	100	0.05	0.45	0.55	0.98	3.38	5.26	12.17
5	100	0.10	0.72	0.96	1.62	4.47	7.02	13.31
6	100	0.20	4.70	3.15	3.60	17.63	16.18	27.66
7	50	0.05	0.44	0.64	1.19	3.45	5.98	12.13
8	50	0.10	1.05	1.04	1.72	5.86	6.85	15.55
9	50	0.20	3.23	3.19	3.73	18.22	17.60	25.15

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla C.1. - Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de los parámetros de corte:  
PCD en Poliamidas

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_c$ (N) (*)		$F_a$ (N) (*)		$F_p$ (N) (*)	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	25.07	31.9	11.11	15.36	2.31	3.17
2	200	0.10	44.94	40.75	11.57	15.17	2.59	2.85
3	200	0.15	71.91	71.38	13.37	16.47	3.29	3.27
4	200	0.20	80.02	92.00	13.96	17.63	3.46	3.55
5	100	0.05	24.42	32.19	11.87	16.13	2.64	2.41
6	100	0.10	44.37	53.33	12.60	18.50	2.96	2.92
7	100	0.15	62.84	75.62	13.76	20.86	3.34	3.40
8	100	0.20	78.99	97.29	15.12	22.99	3.89	3.84
9	50	0.05	25.91	33.56	12.89	17.84	2.51	2.72
10	50	0.10	45.50	55.15	13.69	22.22	2.82	3.45
11	50	0.15	72.68	78.03	15.56	26.00	3.74	4.17
12	50	0.20	81.14	101.31	16.31	30.45	3.76	5.34

\* Media de dos medidas

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.2. - Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de los parámetros de corte:  
K10 en Poliamidas

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_c$ (N) (*)		$F_a$ (N) (*)		$F_p$ (N) (*)	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	34.71	38.87	15.77	24.63	3.94	5.06
2	200	0.10	52.92	66.97	17.13	30.17	3.52	6.34
3	200	0.15	73.88	87.03	19.13	34.17	3.44	7.72
4	200	0.20	94.57	111.20	20.84	37.00	3.83	8.71
5	100	0.05	32.20	39.99	14.92	31.29	2.35	6.32
6	100	0.10	54.04	66.82	19.08	40.63	2.83	8.31
7	100	0.15	78.04	89.64	23.40	44.97	3.51	9.76
8	100	0.20	100.76	110.72	26.56	48.08	4.20	11.04
9	50	0.05	31.62	66.10	14.15	58.77	2.27	14.74
10	50	0.10	53.94	78.61	19.43	76.22	2.98	19.72
11	50	0.15	78.92	97.23	25.50	60.26	4.43	13.66
12	50	0.20	103.42	115.48	31.38	60.65	5.26	13.62

\* Media de dos medidas

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.3. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte:  
PCD en Poliamidas

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)		$P_c$ (W)		$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	27.52	35.54	91.75	116.75	250.70	319.00
2	200	0.10	46.48	43.58	164.49	149.16	224.72	263.77
3	200	0.15	63.45	65.21	243.60	267.33	215.34	245.81
4	200	0.20	81.30	93.74	292.89	336.73	200.06	230.01
5	100	0.05	27.28	36.09	40.53	53.44	244.20	321.95
6	100	0.10	46.22	56.52	73.66	88.53	221.87	266.67
7	100	0.15	65.21	64.98	110.21	121.35	205.34	251.12
8	100	0.20	80.51	100.04	131.12	161.51	197.47	243.23
9	50	0.05	29.05	38.11	21.50	27.85	259.15	335.65
10	50	0.10	47.59	59.60	37.76	45.77	227.50	275.77
11	50	0.15	63.78	66.43	58.76	68.79	221.54	265.53
12	50	0.20	82.85	105.92	67.35	84.09	202.86	253.28

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.4. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte:  
K10 en Poliamidas

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)		$P_c$ (W)		$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	38.33	46.29	127.05	142.26	347.15	388.70
2	200	0.10	55.73	73.72	193.68	245.11	264.60	334.85
3	200	0.15	76.34	82.43	257.54	328.67	246.78	301.60
4	200	0.20	96.92	117.51	346.14	406.99	236.43	278.00
5	100	0.05	35.57	51.16	53.46	66.38	322.05	379.90
6	100	0.10	57.37	78.64	89.70	110.90	270.20	334.10
7	100	0.15	78.43	84.56	122.54	146.79	264.87	317.73
8	100	0.20	104.29	121.21	167.27	183.79	251.91	276.80
9	50	0.05	34.72	89.67	26.24	54.86	316.25	361.00
10	50	0.10	57.41	111.26	44.77	65.25	269.70	320.07
11	50	0.15	77.98	86.59	67.58	76.88	260.01	306.12
12	50	0.20	108.20	131.14	85.83	95.84	258.55	288.70

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.5. - Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de los parámetros de corte:  
PCD en Poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_c$ (N) (*)			$F_a$ (N) (*)			$F_p$ (N) (*)		
			PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30
1	200	0.05	33.11	37.44	40.22	20.62	22.70	33.23	2.66	3.63	7.67
2	200	0.10	58.00	50.26	68.13	20.76	28.35	36.89	2.41	5.14	7.94
3	200	0.15	77.77	87.59	91.44	19.84	31.96	39.88	4.86	6.24	9.09
4	200	0.20	94.50	115.70	112.23	21.63	34.57	42.48	5.25	7.48	9.89
5	100	0.05	53.71	39.29	41.76	18.14	33.52	50.92	4.09	6.60	16.96
6	100	0.10	65.33	66.14	68.06	21.42	40.10	40.92	3.63	8.43	11.14
7	100	0.15	84.17	102.51	90.69	24.88	44.41	44.71	4.01	9.76	11.69
8	100	0.20	100.43	118.82	111.68	28.48	47.93	46.72	4.99	11.14	11.85
9	50	0.05	37.17	35.65	45.40	17.21	45.41	31.49	2.36	8.89	7.09
10	50	0.10	60.80	62.36	71.19	18.76	51.52	34.26	2.77	10.46	7.96
11	50	0.15	82.59	94.62	94.33	28.71	55.98	38.56	4.23	11.84	9.00
12	50	0.20	99.02	124.24	116.39	36.48	59.78	41.32	6.12	12.76	10.17

\* Media de dos medidas

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.6.- Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de los parámetros de corte:  
K10 en Poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_c$ (N) (*)			$F_a$ (N) (*)			$F_p$ (N) (*)		
			PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30
1	200	0.05	35.06	39.34	45.69	22.35	23.67	34.65	3.01	3.87	7.28
2	200	0.10	61.23	56.23	72.47	23.76	31.26	39.82	2.80	5.22	8.09
3	200	0.15	85.22	90.42	103.68	21.08	34.97	42.01	5.82	6.57	10.35
4	200	0.20	99.37	123.45	134.58	24.65	36.91	43.86	6.91	7.86	11.32
5	100	0.05	54.78	45.89	56.89	18.34	37.01	51.98	4.69	6.98	17.08
6	100	0.10	64.78	71.34	72.01	25.54	43.86	43.81	4.07	9.03	12.19
7	100	0.15	87.40	117.38	104.76	27.29	48.03	45.67	4.59	10.52	12.54
8	100	0.20	103.67	124.68	102.45	32.05	52.07	44.81	5.02	11.63	13.04
9	50	0.05	39.58	38.50	46.80	19.72	49.12	42.78	2.61	9.75	7.98
10	50	0.10	57.90	68.21	91.02	21.69	51.98	50.89	3.81	11.39	11.05
11	50	0.15	84.59	103.79	110.86	34.97	57.91	56.72	4.57	12.06	12.86
12	50	0.20	104.67	141.67	132.40	39.40	64.02	73.89	6.83	12.78	13.92

\* Media de dos medidas

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.7. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte:  
PCD en Poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)			$P_c$ (W)			$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )		
			PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30
1	200	0.05	37.69	36.54	47.71	120.41	123.81	143.67	320.00	338.30	392.55
2	200	0.10	58.56	61.34	84.11	199.74	218.13	252.55	276.00	298.00	345.02
3	200	0.15	74.56	85.12	90.45	306.57	321.47	340.08	246.87	287.50	308.20
4	200	0.20	92.72	109.80	133.29	325.86	398.02	420.57	223.2	271.87	287.27
5	100	0.05	37.70	39.27	49.31	54.26	58.86	68.57	332.00	354.60	413.10
6	100	0.10	60.20	64.81	90.50	92.56	102.43	119.31	285.00	308.52	359.37
7	100	0.15	75.67	89.45	97.12	123.89	136.50	145.28	259.65	293.56	315.20
8	100	0.20	95.88	115.20	141.75	152.20	187.42	196.90	238	282.26	296.55
9	50	0.05	53.88	40.56	50.81	37.01	30.50	36.26	346.3	367.50	436.90
10	50	0.10	69.43	68.69	65.18	52.30	53.73	51.76	294.5	323.72	311.82
11	50	0.15	83.45	86.54	103.76	68.21	75.80	79.02	271.23	301.23	308.99
12	50	0.20	103.4	121.00	146.41	81.29	97.40	101.98	241.6	293.40	307.17

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.8. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de los parámetros de corte:  
K10 en Poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)			$P_c$ (W)			$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )		
			PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30	PEEK	CF 30	GF 30
1	200	0.05	42.82	46.32	47.53	121.18	137.03	147.20	331.10	374.40	402.20
2	200	0.10	54.43	73.97	69.19	212.28	183.95	249.35	290.00	351.30	340.65
3	200	0.15	90.87	98.12	101.48	286.21	306.08	314.72	261.32	300.12	309.18
4	200	0.20	117.8	117.67	114.07	345.87	423.46	410.76	236.25	289.25	280.57
5	100	0.05	43.46	53.95	75.92	54.96	62.15	66.78	337.10	392.90	417.60
6	100	0.10	69.61	79.44	77.88	96.28	83.43	113.09	326.65	330.70	340.30
7	100	0.15	95.46	96.45	100.02	121.78	138.64	126.54	282.43	305.67	301.78
8	100	0.20	122.2	122.04	121.39	156.87	192.66	186.30	251.07	297.05	279.20
9	50	0.05	39.65	64.82	69.22	27.48	31.07	33.38	371.70	356.50	454.00
10	50	0.10	65.17	88.49	70.24	48.14	41.71	56.54	304.00	311.80	355.95
11	50	0.15	98.12	103.65	110.65	62.51	71.08	75.53	275.31	312.09	321.78
12	50	0.20	129.6	131.40	137.77	78.43	96.03	93.15	247.55	310.6	290.97

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.9. – Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos:  
PCD en poliamidas

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra *		Rt *		Rp *		Rq *	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	0.46	0.54	4.14	5.32	2.14	2.69	0.59	0.70
2	200	0.10	0.75	0.88	4.24	6.34	2.24	2.99	0.89	1.07
3	200	0.15	1.58	1.61	8.55	9.38	5.44	5.36	2.01	1.96
4	200	0.20	3.06	3.14	13.85	16.65	8.67	10.77	3.69	3.69
5	100	0.05	0.42	0.57	3.47	5.05	1.85	2.76	0.54	0.73
6	100	0.10	0.77	0.88	4.86	6.48	2.84	3.26	0.93	1.07
7	100	0.15	1.67	1.77	9.24	11.12	5.48	6.39	2.17	2.06
8	100	0.20	3.13	3.29	13.92	17.01	9.00	10.93	3.86	3.75
9	50	0.05	0.50	0.59	5.19	4.74	2.42	2.32	0.82	0.74
10	50	0.10	0.85	0.94	5.22	6.65	3.02	3.37	1.02	1.15
11	50	0.15	1.80	1.89	9.75	11.18	6.35	6.50	2.30	2.22
12	50	0.20	3.13	3.46	15.31	16.56	9.94	10.56	4.10	3.76

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla C.10. - Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos:  
K10 en poliamidas

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra *		Rt *		Rp *		Rq *	
			PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	200	0.05	0.51	0.94	3.95	10.05	2.26	3.59	0.63	1.23
2	200	0.10	1.16	1.50	5.57	10.88	3.50	5.41	1.34	1.82
3	200	0.15	2.11	2.27	10.59	14.95	7.07	7.69	2.53	2.87
4	200	0.20	3.96	3.54	16.20	21.66	10.32	12.69	4.66	4.26
5	100	0.05	0.48	0.99	3.93	10.02	2.17	3.39	0.61	1.30
6	100	0.10	1.07	1.63	5.20	11.76	3.28	5.57	1.25	1.95
7	100	0.15	2.04	2.45	10.09	15.66	6.82	7.70	2.44	2.92
8	100	0.20	4.03	3.55	16.98	21.35	11.15	12.98	4.75	4.27
9	50	0.05	0.46	1.05	4.41	11.01	2.11	4.35	0.59	1.37
10	50	0.10	1.10	1.44	5.52	11.35	3.50	4.93	1.28	1.75
11	50	0.15	2.13	2.54	9.35	16.28	6.11	8.88	2.83	3.02
12	50	0.20	4.21	3.63	18.14	22.23	12.22	13.82	4.98	4.43

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla C.11. – Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos:  
PCD en poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra *			Rt *			Rp *			Rq *		
			PEEK	CF30	GF30	PEEK	CF30	GF30	PEEK	CF30	GF30	PEEK	CF30	GF30
1	200	0.05	0.48	0.53	0.77	4.15	4.87	7.63	1.54	2.26	2.97	0.60	0.67	0.99
2	200	0.10	0.69	0.84	1.11	3.74	6.19	9.47	1.97	3.14	4.16	0.81	1.02	1.37
3	200	0.15	1.74	1.41	2.14	9.47	8.97	13.80	6.52	5.03	7.44	2.14	1.77	2.61
4	200	0.20	3.07	2.68	3.47	12.70	15.06	20.14	8.23	9.12	12.18	3.53	3.24	4.16
5	100	0.05	0.47	0.53	0.83	3.59	5.29	7.01	1.49	2.20	3.16	0.58	0.69	1.05
6	100	0.10	0.73	0.86	1.17	4.26	5.58	10.11	2.54	3.01	4.48	0.88	1.05	1.46
7	100	0.15	1.81	1.66	2.24	8.45	9.93	15.69	5.82	5.51	8.35	2.21	2.03	2.71
8	100	0.20	3.27	2.93	3.53	13.89	15.54	18.86	8.99	9.77	12.48	3.75	3.47	4.24
9	50	0.05	0.49	0.61	0.86	3.69	6.35	8.43	1.45	2.78	3.49	0.60	0.78	1.11
10	50	0.10	0.74	1.05	1.17	4.41	6.58	10.22	2.44	3.54	4.82	0.89	1.27	1.46
11	50	0.15	1.90	1.68	2.27	9.56	10.00	16.32	5.95	5.88	8.61	2.35	2.02	2.77
12	50	0.20	2.45	2.87	3.74	15.48	15.10	21.33	9.72	9.83	12.84	4.06	3.48	4.49

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla C.12. – Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos:  
K10 en poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra *			Rt *			Rp *			Rq *		
			PEEK	CF30	GF30	PEEK	CF30	GF30	PEEK	CF30	GF30	PEEK	CF30	GF30
1	200	0.05	0.32	0.55	0.90	3.02	5.02	11.14	1.18	2.22	3.64	0.40	0.70	1.21
2	200	0.10	1.02	0.92	1.51	5.64	5.93	13.07	3.44	3.15	5.83	1.24	1.13	1.76
3	200	0.15	2.48	1.77	2.51	9.82	10.50	17.74	5.54	6.19	7.92	2.83	2.13	3.00
4	200	0.20	4.21	2.99	3.45	19.39	15.62	22.73	12.27	9.47	13.40	4.94	3.63	4.15
5	100	0.05	0.45	0.55	0.98	3.38	5.26	12.17	1.62	2.02	4.32	0.55	0.68	1.33
6	100	0.10	0.72	0.96	1.62	4.47	7.02	13.31	2.76	3.80	6.27	0.92	1.19	2.00
7	100	0.15	2.82	1.72	2.57	12	10.20	17.78	7.81	5.77	8.96	3.33	2.09	3.06
8	100	0.20	4.70	3.15	3.60	17.63	16.18	27.66	10.99	10.16	17.91	5.26	3.76	4.38
9	50	0.05	0.44	0.64	1.19	3.45	5.98	12.13	1.75	2.44	4.42	0.53	0.82	1.54
10	50	0.10	1.05	1.04	1.72	5.86	6.85	15.55	3.64	3.66	7.38	1.30	1.28	2.13
11	50	0.15	2.64	1.94	2.69	10.15	11.24	18.77	6.24	6.38	8.90	3.04	2.35	3.22
12	50	0.20	3.23	3.19	3.73	18.22	17.60	25.15	11.72	11.08	12.93	4.901	3.82	4.49

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)



Tabla C.13. - Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de la profundidad de pasada:  
Poliamidas

Test	Herramienta	$V_c$	$V_a$	P	$F_c$ (N)		$F_a$ (N)		$F_p$ (N)	
					PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	PCD	100	0.10	0.5	10.94	16.39	4.93	10.18	7.49	7.91
2		100	0.10	1	24.95	25.3	12.54	13.13	8.31	6.88
3		100	0.10	2	44.37	53.33	12.6	18.5	2.96	6.92
4		100	0.10	3	84.07	67.55	43.00	32.35	7.74	5.91
5	K10	100	0.10	0.5	9.55	17.68	3.21	9.12	4.20	5.83
6		100	0.10	1	24.41	22.39	10.97	5.94	4.78	3.18
7		100	0.10	2	54.04	66.82	19.08	40.63	2.83	8.31
8		100	0.10	3	78.99	64.45	34.67	43.42	10.41	8.17

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

P: Profundidad de pasada (mm)

Tabla C.14. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de la profundidad de pasada:  
Poliamidas

Test	Herramienta	$V_c$	$V_a$	P	$F_m$ (N)		$P_c$ (W)		$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	
					PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	PCD	100	0.10	0.5	14.14	20.85	18.16	27.21	109.40	163.95
2		100	0.10	1	29.13	29.32	41.41	41.99	124.75	126.50
3		100	0.10	2	46.22	56.52	73.66	88.53	221.87	266.67
4		100	0.10	3	79.00	90.00	112.00	139.00	240.00	290.00
5	K10	100	0.10	0.5	10.92	20.73	15.86	29.34	95.55	176.8
6		100	0.10	1	27.18	23.38	40.52	37.16	122.05	111.95
7		100	0.10	2	57.37	60.00	89.70	110.90	270.20	334.10
8		100	0.10	3	65.00	80.00	131.13	140.00	263.31	300.00

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

P: Profundidad de pasada (mm)

Tabla C.15. - Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos en función de la profundidad de pasada: Poliamidas

Test (+)	Her.	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	P	Ra*		Rt*		Rp*		Rq*	
					PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	PCD	100	0.10	0.5	1.12	1.44	7.5	12.23	4.29	5.98	1.36	1.80
2		100	0.10	1	1.12	1.46	7.37	11.67	4.09	6.47	1.35	1.83
3		100	0.10	2	1.26	1.48	7.86	10.48	3.84	4.26	1.31	1.77
4		100	0.10	3	1.30	1.3	5.15	10.63	4.73	5.52	1.02	1.64
5	K10	100	0.10	0.5	1.28	1.27	8.02	11.48	4.74	4.97	1.70	1.61
6		100	0.10	1	1.35	1.27	8.26	11.45	4.46	5.46	1.57	1.61
7		100	0.10	2	1.37	1.63	8.20	11.76	3.28	5.57	1.25	1.95
8		100	0.10	3	1.48	1.36	7.16	11.48	4.79	5.72	1.23	1.77

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla C.16. - Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función de la profundidad de pasada:  
Poli (éter-éter-cetonas)

Test	Herramienta	$V_c$	$V_a$	P	$F_c$ (N)		$F_a$ (N)		$F_p$ (N)	
					PEEK	CF30	PEEK	CF30	PEEK	CF30
1	PCD	100	0.10	0.5	19.19	18.97	9.83	13.43	9.81	12.59
2		100	0.10	1	36.72	38.74	19.99	28.46	9.65	14.04
3		100	0.10	2	65.33	66.14	21.42	40.10	8.63	10.43
4		100	0.10	3	96.5	99.31	50.67	65.75	8.83	11.63
5	K10	100	0.10	0.5	19.79	18.17	10.36	9.24	13.37	12.99
6		100	0.10	1	33.28	36.73	18.30	21.54	12.90	15.79
7		100	0.10	2	67.89	70.06	25.38	42.30	12.30	16.21
8		100	0.10	3	86.19	103.95	48.67	62.42	12.49	17.89

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

P: Profundidad de pasada (mm)

Tabla C.17. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función de la profundidad de pasada:  
Poli (éter-éter-cetonas)

Test	Herramienta	$V_c$	$V_a$	P	$F_m$ (N)		$P_c$ (W)		$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	
					PEEK	CF30	PEEK	CF30	PEEK	CF30
1	PCD	100	0.10	0.5	23.69	26.43	31.86	31.49	170.00	189.70
2		100	0.10	1	42.91	50.07	60.95	64.30	183.60	193.70
3		100	0.10	2	69.61	79.44	83.43	113.09	300.00	340.30
4		100	0.10	3	109.34	119.67	160.19	164.86	321.66	331.05
5	K10	100	0.10	0.5	26.03	24.17	29.00	30.16	140.00	181.70
6		100	0.10	1	40.11	45.41	55.24	60.97	166.40	183.65
7		100	0.10	2	64.81	90.50	102.43	119.31	250.00	300.00
8		100	0.10	3	99.76	122.56	143.07	172.56	287.30	346.51

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

P: Profundidad de pasada (mm)

Tabla C.18. - Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos en función de la profundidad de pasada: Poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	Her.	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	P	Ra*		Rt*		Rp*		Rq*	
					PEEK	CF30	PEEK	CF30	PEEK	CF30	PEEK	CF30
1	PCD	100	0.10	0.5	0.51	0.72	4.27	4.54	3.41	3.59	0.88	1.03
2		100	0.10	1	0.73	0.89	5.54	5.60	3.59	3.49	1.05	1.10
3		100	0.10	2	0.81	0.86	6.26	6.58	3.54	4.01	1.03	1.05
4		100	0.10	3	0.90	0.89	7.22	7.14	3.87	3.79	1.12	1.13
5	K10	100	0.10	0.5	0.64	0.82	4.80	4.93	3.50	3.57	0.74	1.05
6		100	0.10	1	0.75	0.81	5.93	6.25	3.69	3.95	0.89	1.01
7		100	0.10	2	0.82	0.90	6.47	7.02	3.76	3.80	0.92	1.19
8		100	0.10	3	0.94	0.96	7.35	7.89	4.01	4.01	1.10	1.13

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla C.19. - Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función del tipo de herramienta: Poliamidas

Test (+)	Herramienta	$V_c$	$V_a$	$F_c$ (N)		$F_a$ (N)		$F_p$ (N)	
				PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	CVD	100	0.05	22.44	35.08	3.38	25.2	1.11	1.84
2		100	0.10	37.48	56.81	0.49	22.54	1.41	0.54
3		100	0.15	52.35	75.84	1.83	20.59	3.95	3.27
4		100	0.20	66.69	93.61	4.74	18.16	6.62	5.71
5	PCD	100	0.05	24.42	32.19	11.87	16.13	2.64	2.41
6		100	0.10	44.37	53.33	12.6	18.5	2.96	2.92
7		100	0.15	62.84	75.62	13.76	20.86	3.34	3.4
8		100	0.20	78.99	97.29	15.12	22.99	3.89	3.84
1	H10	100	0.05	30.43	34.47	15.66	28.53	2.68	3.50
2		100	0.10	45.19	58.27	12.66	39.95	5.26	2.68
3		100	0.15	60.85	78.47	8.93	44.06	7.98	1.00
4		100	0.20	76.19	96.23	5.48	44.14	10.58	2.18
5	K10	100	0.05	32.2	39.99	14.92	31.29	2.35	6.32
6		100	0.10	54.04	66.82	19.08	40.63	2.83	8.31
7		100	0.15	78.04	89.64	23.4	44.97	3.51	9.76
8		100	0.20	100.76	110.72	26.56	48.08	4.2	11.04

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.20. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función del tipo de herramienta: Poliamidas

Test (+)	Herramienta	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)		$P_c$ (w)		$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	
				PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	CVD	100	0.05	23.56	33.45	33.49	48.90	225.75	298.54
2		100	0.10	43.87	54.59	67.11	78.43	210.59	242.71
3		100	0.15	64.98	60.60	106.25	109.32	191.46	218.48
4		100	0.20	78.98	96.15	118.62	149.67	162.98	206.70
5	PCD	100	0.05	27.28	36.09	40.53	53.44	244.20	321.95
6		100	0.10	46.22	56.52	73.66	88.53	221.87	266.67
7		100	0.15	65.21	64.98	110.21	121.35	205.34	251.12
8		100	0.20	80.51	100.04	131.12	161.51	197.47	243.23
1	H10	100	0.05	29.56	42.09	48.23	56.78	308.21	368.45
2		100	0.10	46.89	68.21	71.03	102.40	267.39	321.44
3		100	0.15	69.25	78.53	116.84	135.94	256.87	293.68
4		100	0.20	97.43	105.60	150.79	163.28	235.71	253.80
5	K10	100	0.05	35.57	51.16	53.46	66.38	322.05	379.90
6		100	0.10	57.37	78.64	89.70	110.90	270.20	334.10
7		100	0.15	78.43	84.56	122.54	146.79	264.87	317.73
8		100	0.20	104.29	121.21	167.27	183.79	251.91	276.80

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C.21. - Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad  
medidos en función del tipo de herramienta: Poliamidas

Test (+)	Herramienta	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra*		Rt*		Rp*		Rq*	
				PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66	PA 6	PA 66
1	CVD	100	0.05	0.48	0.63	3.57	5.22	1.94	3.11	0.62	0.75
2		100	0.10	0.84	0.91	5.09	6.86	3.12	3.45	0.99	1.23
3		100	0.15	1.61	1.97	9.54	11.56	5.86	6.73	2.32	2.41
4		100	0.20	3.45	3.39	14.13	17.62	10.03	11.08	3.89	3.96
5	PCD	100	0.05	0.42	0.57	3.47	5.05	1.85	2.76	0.54	0.73
6		100	0.10	0.77	0.88	4.86	6.48	2.84	3.26	0.93	1.07
7		100	0.15	1.67	1.77	9.24	11.12	5.48	6.39	2.17	2.06
8		100	0.20	3.13	3.29	13.92	17.01	9.00	10.93	3.86	3.75
1	H10	100	0.05	0.43	0.91	3.85	9.56	2.04	3.01	0.56	1.09
2		100	0.10	1.01	1.58	5.09	11.87	3.16	4.97	1.14	1.87
3		100	0.15	1.97	2.37	9.93	15.38	6.26	7.45	2.28	2.76
4		100	0.20	4.01	3.51	16.31	21.31	10.94	12.59	4.51	4.23
5	K10	100	0.05	0.48	0.99	3.93	10.02	2.17	3.39	0.61	1.3
6		100	0.10	1.07	1.63	5.20	11.76	3.28	5.57	1.25	1.95
7		100	0.15	2.04	2.45	10.09	15.66	6.82	7.7	2.44	2.92
8		100	0.20	4.03	3.55	16.98	21.35	11.15	12.98	4.75	4.27

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante (P = 2 mm)

Tabla C.22. - Valores de  $F_c$ ,  $F_a$  y  $F_p$  en función del tipo de herramienta:  
Poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	Herramienta	$V_c$	$V_a$	$F_c$ (N)		$F_a$ (N)		$F_p$ (N)	
				PEEK	CF30	PEEK	CF30	PEEK	CF30
1	CVD	100	0.05	35.99	35.70	6.00	19.72	2.54	2.37
2		100	0.10	52.15	55.88	13.37	22.02	3.00	2.50
3		100	0.15	70.04	75.29	17.76	23.81	3.43	2.86
4		100	0.20	87.46	93.60	21.00	27.30	3.68	5.45
5	PCD	100	0.05	53.71	39.29	18.14	33.52	4.09	6.60
6		100	0.10	65.33	66.14	21.42	40.10	3.63	8.43
7		100	0.15	84.17	102.51	24.88	44.41	4.01	9.76
8		100	0.20	100.43	118.82	28.48	47.93	4.99	11.14
1	H10	100	0.05	38.67	38.90	9.23	23.89	3.28	3.46
2		100	0.10	61.23	60.35	14.56	28.40	3.45	4.87
3		100	0.15	72.34	80.03	19.87	29.04	4.08	4.90
4		100	0.20	87.98	98.86	25.69	30.84	4.56	6.72
5	K10	100	0.05	54.78	45.89	18.34	37.01	4.69	6.98
6		100	0.10	64.78	71.34	25.54	43.86	4.07	9.03
7		100	0.15	87.40	117.38	27.29	48.03	4.59	10.52
8		100	0.20	103.67	124.68	32.05	52.07	5.02	11.63

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)

Tabla C. 23. - Valores de  $F_m$ ,  $P_c$  y  $K_s$  en función del tipo de herramienta:  
Poli (éter-éter-cetonas)

Test (+)	Herramienta	$V_c$	$V_a$	$F_m$ (N)		$P_c$ (w)		$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	
				PEEK	CF30	PEEK	CF30	PEEK	CF30
1	CVD	100	0.05	32.31	45.00	59.74	59.26	359.9	357
2		100	0.10	55.09	60.74	86.57	92.76	260.77	279.4
3		100	0.15	71.39	78.49	116.27	124.98	233.48	250.96
4		100	0.20	87.67	95.81	145.19	155.38	218.66	234.01
5	PCD	100	0.05	37.70	39.27	54.26	58.86	332	354.6
6		100	0.10	60.20	64.81	92.56	102.43	285	308.52
7		100	0.15	75.67	89.45	123.89	136.50	259.65	293.56
8		100	0.20	95.88	115.2	152.20	187.42	238	282.26
1	H10	100	0.05	42.56	49.78	50.98	59.84	334.12	387.65
2		100	0.10	65.78	70.65	89.56	76.12	314.57	325.78
3		100	0.15	90.65	94.23	113.51	127.50	269.08	295.29
4		100	0.20	118.54	125.67	157.45	189.77	250.31	279.37
5	K10	100	0.05	43.46	53.95	54.96	62.15	337.1	392.9
6		100	0.10	69.61	79.44	96.28	83.43	326.65	330.7
7		100	0.15	95.46	96.45	121.78	138.64	282.43	305.67
8		100	0.20	122.2	122.04	156.87	192.66	251.07	297.05

$V_c$ : Velocidad de corte (m/min)

$V_a$ : Velocidad de avance (mm/rev)

+ Profundidad de pasada constante ( $P = 2$  mm)



Tabla C.24. - Valores medios de los diferentes parámetros de rugosidad medidos en función del tipo de herramienta:

*Poli (éter-éter-cetonas)*

Test (+)	Her.	V <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	Ra*		Rt*		Rp*	
				PEE K	CF30	PEE K	CF30	PEE K	CF30
1	CVD	100	0.05	0.56	0.85	4.82	7.43	1.53	2.35
2		100	0.10	1.23	1.73	7.67	9.56	2.65	3.14
3		100	0.15	2.11	2.71	11.50	12.76	6.02	5.87
4		100	0.20	3.30	4.01	16.90	17.40	9.56	10.07
5	PCD	100	0.05	0.47	0.53	3.59	5.29	1.49	2.20
6		100	0.10	0.73	0.86	4.26	5.58	2.54	3.01
7		100	0.15	1.81	1.66	8.45	9.93	5.82	5.51
8		100	0.20	3.27	2.93	13.89	15.54	8.99	9.77
1	H10	100	0.05	0.42	0.51	3.24	5.12	1.61	1.79
2		100	0.10	0.70	0.78	4.37	6.89	2.56	3.68
3		100	0.15	2.85	1.61	10.67	9.34	7.59	5.52
4		100	0.20	4.56	2.96	15.98	16.05	10.49	9.85
5	K10	100	0.05	0.45	0.55	3.38	5.26	1.62	2.02
6		100	0.10	0.72	0.96	4.47	7.02	2.76	3.80
7		100	0.15	2.82	1.72	12	10.20	7.81	5.77
8		100	0.20	4.70	3.15	17.63	16.18	10.99	10.16

\* Media de 10 medidas

V<sub>c</sub>: Velocidad de corte (m/min)

V<sub>a</sub>: Velocidad de avance (mm/rev)