



## APROXIMACIÓN AL ESTUDIO DE LA MAQUINABILIDAD DE LAS POLIAMIDAS PA 6 Y PA 66-GF30. MODELO ESTADÍSTICO

FRANCISCO MATA<sup>1</sup>, JOÃO PAULO DAVIM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Castilla-La Mancha  
Polytechnical School of Almadén  
Plaza Manuel Meca, 1, 13412 Almadén, Spain

<sup>2</sup>University of Aveiro  
Department of Mechanical Engineering  
Campus Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

(Recibido 20 de febrero de 2010, para publicación 15 de marzo de 2010)

**Resumen** – En este artículo se recurre a métodos estadísticos para analizar la maquinabilidad de las poliamidas PA 6 y PA 66-GF, reforzada con fibras de vidrio. Se aplica el análisis de varianza para cuantificar la influencia de los parámetros funcionales de corte sobre la evolución de las fuerzas de corte y del acabado superficial y se desarrollan modelos de predicción para anticipar el comportamiento de estos materiales ante unas condiciones de corte dadas.

**Palabras clave** – Poliamida, maquinabilidad, ANOVA, PCD.

### 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de los materiales compuestos se ha incrementado a un ritmo considerable en diversos campos de la ciencia y de la tecnología debido a su elevada rigidez y resistencia específica, bajo peso, buena resistencia al desgaste y a la corrosión, estabilidad dimensional, excelente relación resistencia a fatiga/peso y propiedades direccionales (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.

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.

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, inyectores, 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.

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

Tabla 1. Propiedades de los materiales ensayados (ERTA®).

Propiedad	PA 6	PA 66-GF30	Unidad
Módulo de elasticidad (E)	1400	3200	MPa
Dureza Rockwell	M85	M76	-
Resistencia al impacto	Sin fractura	50	KJ/m <sup>2</sup>
Temperatura de fusión	220	255	°C
Densidad	1.14	1.29	g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica (<150°C)	90x10 <sup>-6</sup>	50x10 <sup>-6</sup>	m/m/k
Coefficiente de expansión térmica (>150°C)	105x10 <sup>-6</sup>	60x10 <sup>-6</sup>	m/m/k

“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).

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.

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.

El objetivo de este trabajo experimental es evaluar la maquinabilidad de las poliamidas PA 6 Y PA 66-GF30 a través del análisis de las fuerzas de corte y del acabado superficial, al tiempo que estudiar el comportamiento de dos tipos de herramientas, bajo condiciones de corte prefijadas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos de mecanizado se han realizado sobre las poliamidas PA 6 y PA 66-GF30, cuyas propiedades más significativas se reflejan en la Tabla 1.

Se prepararon probetas de 50 mm de diámetro y 100 mm de longitud a partir de redondos extruidos. En cuanto a las herramientas de corte, se utilizaron pastillas de diamante policristalino (PCD) (DCMW 11T3 04FPDC10) y de carburo cementado (K10) (DCMW 11T3 04 H13A), con un porta herramientas tipo SDJCL 2020 K11.

El torno utilizado, CNC “Kingsbury® MHP 50”, de 18 kW de potencia y 4500 rpm de velocidad máxima, se refleja en la Fig. 1.

Los ensayos se desarrollaron sin refrigeración y utilizando la combinación de tres velocidades de corte (100, 200, 400 m/min) y tres velocidades de avance (0.05, 01, 02 mm/rev), con una profundidad de pasada constante de 2 mm.



Fig. 1. Detalles de la adquisición de las fuerzas de corte.

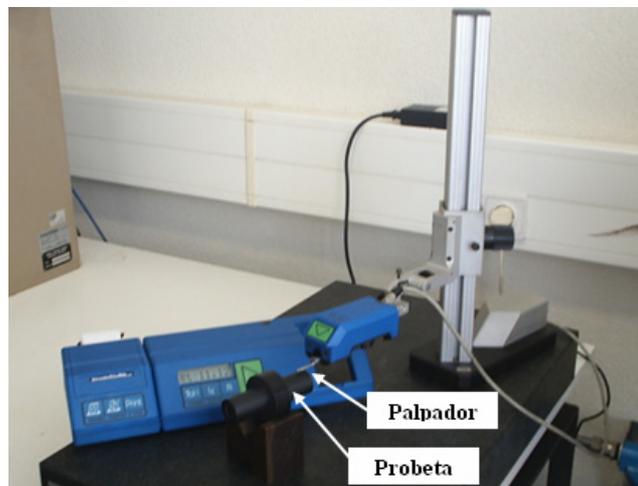


Fig. 2. Rugosímetro Hommeltester – T 1000 utilizado para caracterizar las superficies.

Para la adquisición de las fuerzas de corte, se ha utilizado un dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9121 (Fig. 1). La medida de la rugosidad de las superficies mecanizadas se ha materializado con un rugosímetro Hommeltester – T 1000 (Fig. 2).

El tratamiento de los resultados experimentales se ha basado en el análisis de varianza (ANOVA) (Ross, 1988). Para la elaboración del plan experimental se ha utilizado la matriz ortogonal para dos factores y tres niveles, L9 (24).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis de varianza

La Tabla 2 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 la velocidad de avance es significativa sobre la variable dependiente (Test  $F > F_{\alpha=5\%}$  y  $P(\%) > \text{error}$ ), siendo además el factor que tiene una influencia más elevada en los resultados para los dos materiales y los dos tipos de herramienta ensayados. La velocidad de corte no es significativa sobre la variable dependiente en todos los casos, presentando además porcentajes de contribución prácticamente nulos en el caso del material no reforzado.

Tabla 2. Tabla ANOVA para la fuerza de mecanizado.

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	15,16	2		2,73	7,58	206,92	0,9	6,94		0,1	0,0
	V <sub>a</sub>	4.437	7.048	2		2.218	3.524	167.615	417,08	6,94		99,9	98,7
	Int.	0,20	25,75	4		0,10	12,8	7,6	1,52	0		0,0	0,1
	Error	0,05	33,8	4		0,01	8,45	/	/	/		0,0	0,9
	Total	4.443	7.123	8		/	/	/	/	/		100	100
PA 66 GF30	V <sub>c</sub>	161,53	1.743	2		80,76	871,7	7,31	22,33	6,94		2,1	21,7
	V <sub>a</sub>	6.465	5.615	2		3.232	2.808	292,77	71,92	6,94		96,4	72,1
	Int.	16,13	161,4	4		8,06	80,7	0,73	2,07	0		0,4	0,1
	Error	44,16	156,16	4		11,04	39,04	/	/	/		1,3	4,1
	Total	6.687	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

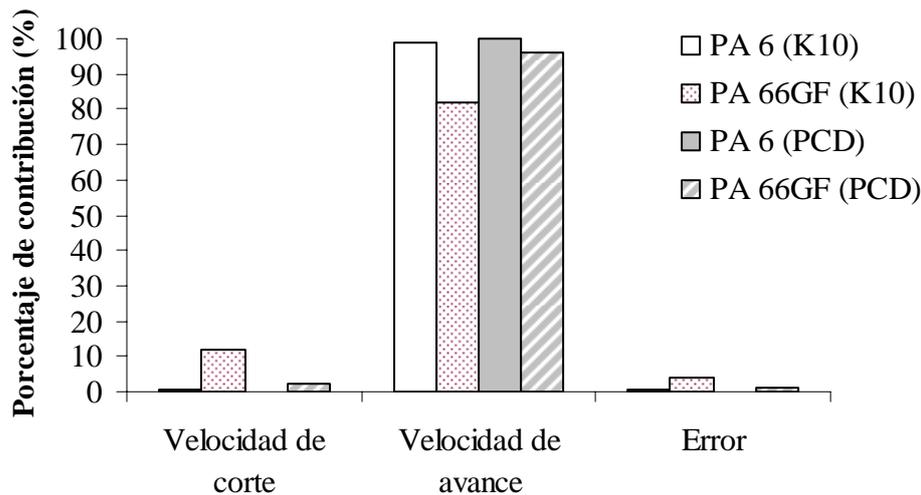


Fig. 3. Representación de los porcentajes de contribución: fuerza de mecanizado.

La Fig. 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 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.

La Tabla 3 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.

Tabla 3. Tabla ANOVA para la potencia de corte.

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>	24.206	34.862	2		12.103	17.431	19,51	27,35	6,94		49,2	52,2
	V <sub>a</sub>	17.437	24.276	2		8.718	12.138	14,06	19,04	6,94		34,7	35,7
	Int.	2.533	2.680	4		1.267	1.340	2,04	2,1	0		0,1	0,2
	Error	2.481	2.550	4		620,3	637,44	/	/	/		10,6	7,9
	Total	46.657	64.367	8		/	/	/	/	/		100	100
PA 66 GF30	V <sub>c</sub>	25.971	45.410	2		12.985	22.705	18,94	18,24	6,94		43,1	51,8
	V <sub>a</sub>	24.345	27.150	2		12.173	13.575	17,76	10,9	6,94		40,3	29,8
	Int.	3.990	5.293	4		1.995	2.646	2,91	2,12	0		2,2	0,4
	Error	2.741,7	4.980	4		685,44	1.245	/	/	/		9,6	12,0
	Total	57.047	82.834	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

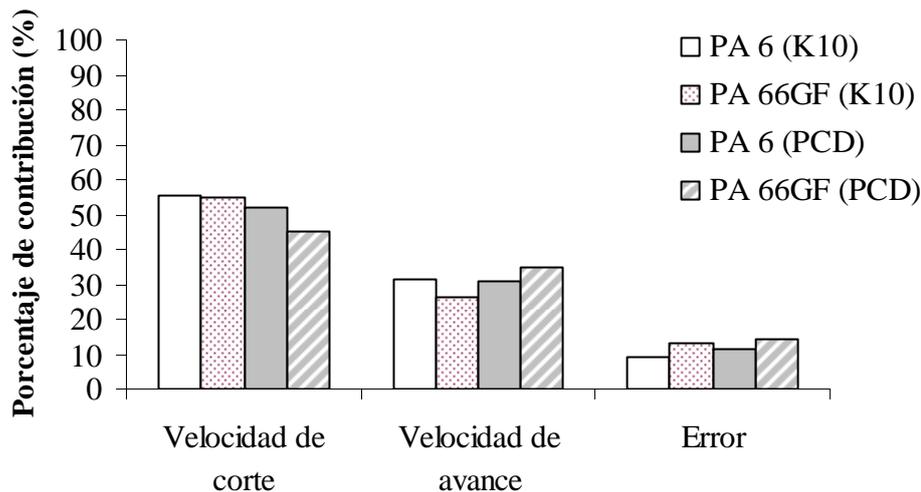


Fig. 4. Representación de los porcentajes de contribución.

La Fig. 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 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.

La Tabla 4 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 la velocidad de avance es significativa sobre la variable dependiente (Test F > F $\alpha$ =5% y P (%) > error). La velocidad de avance no llega a ser significativa en

Tabla 4. Tabla ANOVA para la fuerza específica de corte.

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	3,32	2		56,10	1,66	14,56	0,01	6,94		2,6	2,0
	V <sub>a</sub>	3.935	10.317	2		1.968	5.158	510,65	44,64	6,94		96,3	90,6
	Int.	14,36	350,76	4		7,18	175,38	1,86	1,51	0		0,0	1,0
	Error	15,41	462,2	4		3,85	115,5	/	/	/		0,8	8,3
	Total	4.077	11.133	8		/	/	/	/	/		100	100
PA 66 GF30	V <sub>c</sub>	2.205	25.188	2		1.102	12.594	7,44	4,03	6,94		11,6	16,8
	V <sub>a</sub>	12.882	62.815	2		6.441	31.407	43,47	10,06	6,94		76,8	50,2
	Int.	707	12.177	4		353,4	6.088	2,38	1,95	0		0,7	0,3
	Error	593	12.491	4		148,16	3.123	/	/	/		7,2	22,2
	Total	16.387	112.670	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

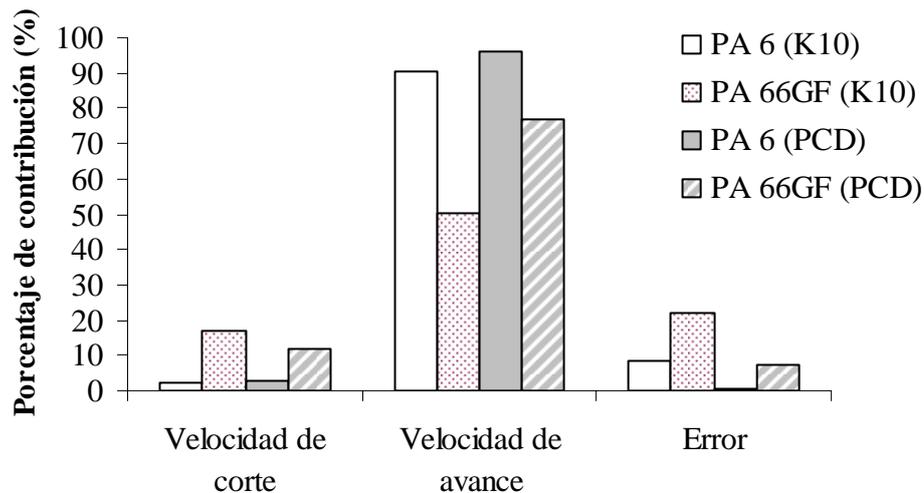


Fig. 5. Representación de los porcentajes de contribución: fuerza específica de corte.

todos los casos. 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 Fig. 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 observa claramente cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados (superiores al 90% para el material no reforzado) 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. Tabla ANOVA para la rugosidad media.

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

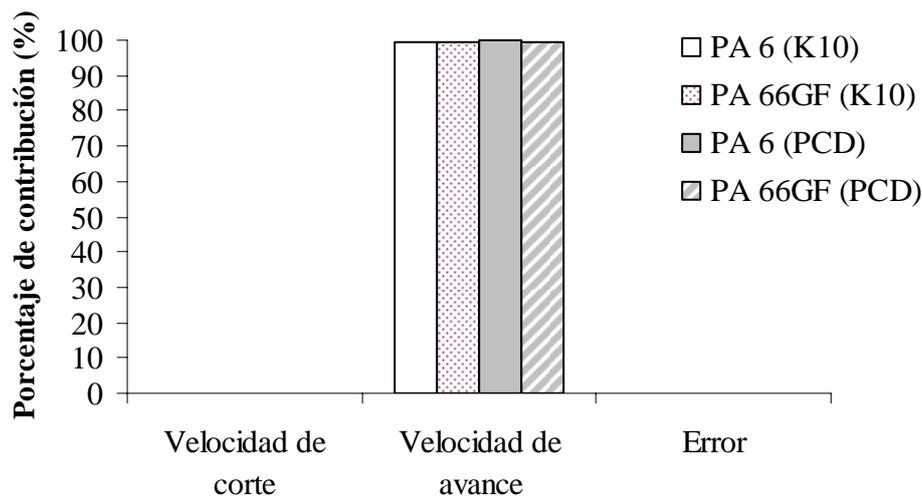
SDC – Suma de cuadrados, Gl – Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

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

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

Fig. 6. Representación de los porcentajes de contribución: Rugosidad media ( $R_a$ ).

La Tabla 5 presenta los resultados del análisis de varianza para la rugosidad media ( $R_a$ ). Como se puede observar, tanto la velocidad de corte como la velocidad de avance tienen significado físico y estadístico sobre la rugosidad obtenida (Test F > F $\alpha$ =5% y P (%) > 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 Fig. 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 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 6. Tabla ANOVA para la rugosidad máxima.

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

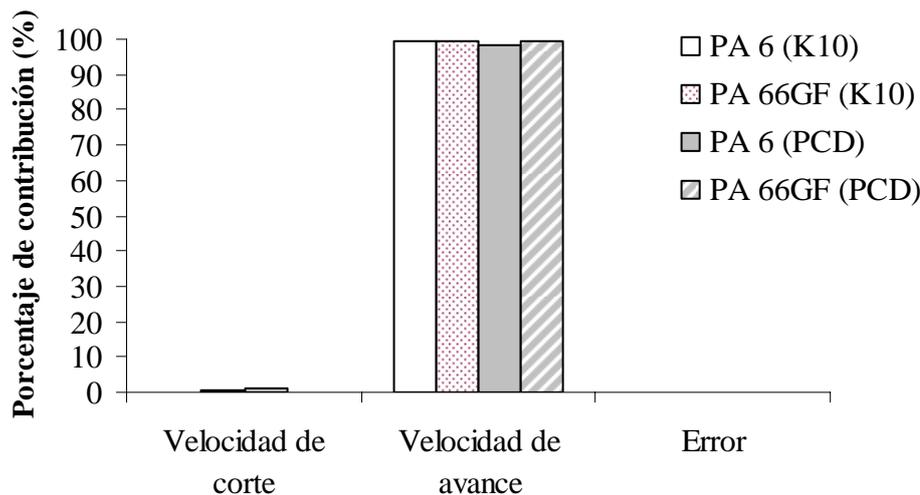
SDC – Suma de cuadrados, Gl –Grados de libertad, P- Porcentaje de contribución, Int. – Interacción V<sub>c</sub>/V<sub>a</sub>

PCD: Herramienta de diamante policristalino

K10: Herramienta de carburo cementado

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

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

Fig. 7. Representación de los porcentajes de contribución: Rugosidad máxima ( $R_t$ ).

La Tabla 6 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 (Test F > F $\alpha$ =5% y P (%) > 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 Fig. 7 muestra los diferentes porcentajes de contribución de 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 7. Modelos de predicción para la fuerza de mecanizado.

Material	Hr.	Modelos de predicción $F_m$
<b>PA 6</b>	PCD	$F_m = 11,414 - 7,366 \times 10^{-3} \times V_c + 356 \times V_a$ (1)
	K10	$F_m = 15,481 - 2,078 \times 10^{-2} \times V_c + 448,6 \times V_a$ (2)
<b>PA 66</b> <b>GF30</b>	PCD	$F_m = 21,183 - 6,803 \times 10^{-2} \times V_c + 428,495 \times V_a$ (3)
	K10	$F_m = 66,427 - 0,186 \times V_c + 398,679 \times V_a$ (4)

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

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

Tabla 8. Modelos de predicción para la potencia de corte.

Material	Hr.	Modelos de predicción $P_c$
<b>PA 6</b>	PCD	$P_c = -82,47 + 0,831 \times V_c + 705,480 \times V_a$ (5)
	K10	$P_c = -94,228 + 0,997 \times V_c + 832,53 \times V_a$ (6)
<b>PA 66</b> <b>GF30</b>	PCD	$P_c = -84,881 + 0,860 \times V_c + 828,41 \times V_a$ (7)
	K10	$P_c = -90,94 + 1,137 \times V_c + 879,92 \times V_a$ (8)

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

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

Tabla 9. Modelos de predicción para la fuerza específica de corte.

Material	Hr.	Modelos de predicción $K_s$
<b>PA 6</b>	PCD	$K_s = 266,087 - 2,103 \times 10^{-2} \times V_c - 327,78 \times V_a$ (9)
	K10	$K_s = 337,043 + 8,923 \times 10^{-3} \times V_c - 481,833 \times V_a$ (10)
<b>PA 66</b> <b>GF30</b>	PCD	$K_s = 358,078 - 0,250 \times V_c - 485,719 \times V_a$ (11)
	K10	$K_s = 484,851 - 0,273 \times V_c - 877,583 \times V_a$ (12)

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

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

### 3.2. Modelos de regresión

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.

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 7 a 11 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

Tabla 10. Modelos de predicción para la rugosidad media.

Material	Hr.	Modelos de predicción $R_a$
<b>PA 6</b>	PCD	$R_a = -0,648 - 4,238 \times 10^{-4} \times V_c + 18,433 \times V_a$ (13)
	K10	$R_a = -0,966 - 2,428 \times 10^{-4} \times V_c + 24,7 \times V_a$ (14)
<b>PA 66</b> <b>GF30</b>	PCD	$R_a = -0,526 - 9,047 \times 10^{-4} \times V_c + 19,023 \times V_a$ (15)
	K10	$R_a = 0,01 - 3,571 \times 10^{-4} \times V_c + 17,671 \times V_a$ (16)

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

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

Tabla 11. Modelos de predicción para la rugosidad máxima.

Material	Hr.	Modelos de predicción $R_t$
<b>PA 6</b>	PCD	$R_t = 0,25 - 6,657 \times 10^{-3} \times V_c + 71,371 \times V_a$ (17)
	K10	$R_t = -1,197 - 4,661 \times 10^{-3} \times V_c + 91,023 \times V_a$ (18)
<b>PA 66</b> <b>GF30</b>	PCD	$R_t = -0,155 + 5,761 \times 10^{-4} \times V_c + 81,519 \times V_a$ (19)
	K10	$R_t = 5,626 - 4,066 \times 10^{-3} \times V_c + 79,947 \times V_a$ (20)

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

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

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.

### 3.3. Validación del modelo

Las Tablas 12 a 16 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. Tan sólo se obtienen errores mayores en algunos modelos de la potencia de corte.

## 4. CONCLUSIONES

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.

La influencia del material 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.

Tabla 12. Validación del modelo experimental:  $F_m$ .

Material	Ensayo	Fuerza de mecanizado ( $F_m$ ) (N)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PA 6		PCD	K10	Ec. 16	Ec. 17	PCD	K10
	1	73,22	76,39	63,34	78,77	13,49	3,1
	2	64,42	81,54	64,07	80,77	0,54	0,94
	3	74,42	83,06	64,44	81,77	13,41	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 13. Validación del modelo experimental:  $P_c$ .

Material	Ensayo	Potencia de corte ( $P_c$ ) (W)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PA 6		PCD	K10	Ec. 20	Ec. 21	PCD	K10
	1	239,46	246,02	189,55	230,05	20,84	6,4
	2	104,32	129,54	106,45	130,45	2,04	0,007
	3	60,32	65,50	64,34	80,50	6,6	22,9
PA 66 GF30		PCD	K10	Ec. 22	Ec. 23	PCD	K10
	1	237,70	289,81	211,38	268,44	11	7,3
	2	125,53	148,80	125,38	154,74	0,001	3,9
	3	64,76	80,70	82,38	97,89	21,2	21,3

\* Media de 2 medidas

Tabla 14. Validación del modelo experimental:  $K_s$ .

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 15. Validación del modelo experimental:  $R_a$ .

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 16. Validación del modelo experimental:  $R_z$ .

Material	Ensayo	Rugosidad máxima ( $R_z$ ) ( $\mu\text{m}$ )					
		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

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, Test  $F > F_{\alpha=5\%}$  y el  $P(\%) >$  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.

## REFERENCIAS

- [1] An, S.O., Lee, E.S., Noh, S.L., "A study on the cutting characteristics of glass fiber reinforced plastics with respect to tool materials and geometries", *Journal of Materials Processing Technology*, **68**, 60-67 (1997)
- [2] Bernardos, P.G., Vosniakos, C.G., "Predicting surface roughness in machining: a review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **43**, 833-844 (2003)
- [3] Bernasconi, A., Davoli, P., Basile, A., Filippi, A., "Effect of fibre orientation on the fatigue behaviour of a short glass fibre reinforced polyamide-6", *International Journal of Fatigue*, **29**, 199-208 (2007)
- [4] Botelho, E.C., Figiel, L., Rezende, M.C., Lauke, B., "Mechanical behaviour of carbon fiber reinforced polyamide composites", *Composites Science and Technology*, **63**, 1843-1855 (2003)
- [5] Chang, C.S., "Turning of glass-fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools", *Journal of Materials Processing Technology*, **180**, 117-129 (2006)
- [6] Chavarria, F., Paul, D.R., "Comparison of nanocomposites based on nylon 6 and nylon 66", *Polymer*, **45**, 8501-8515 (2004)
- [7] Chen, Y.K., Modi, O.P., Mhay, A.S., Chrysanthou, A., O'Sullivan, J.M., "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*, **255**, 714-721 (2003)
- [8] Davim, J.P., Reis, P., António, C.C., "Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up", *Composite Science and Technology*, **84**, 289-297 (2004)
- [9] El-Sonbaty, U.A., Khashaba, T., Machaly, T., "Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites", *Composite Structures*, **63**, 329-338 (2004)
- [10] Ferreira, J.R., Coppini, N.L., Levy Neto, F., "Characteristics of carbon-carbon composite turning", *Journal of Materials Processing Technology*, **109**, 65-71 (2001)
- [11] Franke, R., Haase, I., Lehmann, D., Hupfer, B., Janke, A., "Manufacturing and tribological properties of sandwich materials with chemically bonded PTFE-PA 66 and PA 66/GF", *Wear*, **262**, 958-971 (2007)
- [12] Govindan Potti, P.K., Rao, B.N., Srivastava, V.K., "Notched tensile strength for long- and short-fiber reinforced polyamide", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **33**, 145-152 (2000)
- [13] Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Process and Systems*, Prentice Hall International Editions (1996)
- [14] Hocheng, H., Tsao, C.C., "The path towards delamination-free drilling of composite materials", *Journal of Materials Processing Technology*, **167**(2-3), 251-264 (2005)
- [15] Hocheng, H., Tsao, C.C., "Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**(12-13), 1403-1416 (2006)
- [16] Kalpakjian, S., Schmid, S.R., *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Pearson Educación, México (2002)
- [17] Kaw, A., *Mechanics of composite materials*, CRC Press (1997)
- [18] Koplev, A., "Cutting of CFRP with single edge tools", *3rd International Conference on Composite Materials*, Paris (1980)
- [19] Koplev, A., Lystrup, A., Vorm, T., "The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP", *Composites*, **14**(4), 371-376 (1983)
- [20] Krishan, K.C., "Composite materials. Science and engineering", Springer (1998)
- [21] Miravete, A., Larrodé, E., Castejón, L., Clemente, R. *et al.*, *Materiales compuestos* (Tomos I y II), Ed. A.M. (2000)
- [22] Palabiyik, M., Bahadur, S., "Tribological studies of polyamide 6 and high-density polyethylene blends filled with PTFE and copper oxide and reinforced with short glass fibers", *Wear*, **253**, 269-376 (2002)
- [23] Pedroso, A.G., Mei, L.H.I., Agnelli, J.A.M., Rosa, D.S., "The influence of the drying process time on the final properties of recycled glass fiber reinforced polyamide 6", *Polymer Testing*, **21**, 229-232 (2002)
- [24] Ross, P.J., *Taguchi techniques for quality engineering, loss function*, McGraw Hill, New York, 43-151 (1996)
- [25] Wang, X.M., Zhang, L.C., "Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **35**, 1623-1638 (1995-a)
- [26] Wang, X.M., Zhang, L.C., "Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **35**, 1639-1648 (1995-b)

## **MACHINABILITY STUDY APPROACH OF POLYAMIDES PA 6 AND PA 66-GF30. STATISTICAL MODEL**

**Abstract** – In this paper, the machinability of polyamides PA6 and PA 66-GF30 (reinforced with glass fibers) is analyzed using statistical methods. To quantify the influence of cutting parameters on the evolution of cutting forces and surface finish, analysis of variance is applied. To predict the behavior of these materials before a few given cutting conditions, mathematical models are developed.

**Keywords** –Polyamides, Machinability, ANOVA, PCD