

MODELOS ESTADÍSTICOS PARA EL ANÁLISIS DE LA MAQUINABILIDAD DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLI (ÉTER-ÉTER-CETONA)

Francisco Mata¹ J. Paulo Davim²

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

²Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro, Campus Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

RESUMEN

En este artículo se recurre a métodos estadísticos para analizar la maquinabilidad de materiales compuestos de matriz termoplástica.

Se aplicará el análisis ANOVA para cuantificar la influencia de los parámetros funcionales de corte sobre la evolución de las fuerzas de corte y del acabado superficial.

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.

Palabras Clave: PEEK, maquinabilidad, ANOVA, PCD.

ABSTRACT

In this paper statistic techniques are employed to analyze the machinability of thermoplastic composite materials. Analysis of variance (ANOVA) is used to quantify the influence of cutting parameters on cutting forces and surface finish.

Predictive models, based on multiple analysis regression, are carried out to predict the behaviour before cutting conditions. Finally, the results of confirmation test are presented, to validate the proposed models.

Keywords: PEEK, machinability, ANOVA, PCD.

INTRODUCCIÓN

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 requiere una alta calidad superficial, incluyendo la exactitud y la integridad superficial (Wang & 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.

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 & Friedrich, 1987; Ozden *et al.*, 1999; Davim & 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 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 & Tewari, 2003; Sinmazcelik & Yilmaz, 2007; Burris & 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.

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 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 y heterogéneos. Además, la conformación previa al mecanizado incluye procesos especiales de laminación o extrusión que afectan al arranque de viruta posterior.

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 o aptitud para el mecanizado de estos materiales, en relación con los materiales constituidos por una sola fase, como los metales (Voss & Friedrich, 1987, Krishnamurthy *et al.* 1992, Rahman *et al.* 1999-a y 1999-b).

El objetivo de este trabajo experimental es evaluar la influencia de las fibras de refuerzo sobre la aptitud al mecanizado de los compuestos de Poli (éter-éter-cetona), 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.

METODOLOGÍA

Metodología Taguchi

El plan experimental, desarrollado con base al Método de Taguchi (Ross, 1996), se compone de varias etapas, entre las que destacan las siguientes (Alexis, 1995; Ross, 1996; 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 tabla 1 presenta la matriz seleccionada, $L_9(3^4)$, 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 poli (éter-éter-cetonas).

Tabla 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

La tabla 2 indica los factores estudiados y la asignación de los niveles correspondientes.

Tabla 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)

Detalles de la experimentación

Los ensayos de mecanizado se han realizado sobre los siguientes materiales:

- 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)

Las propiedades más significativas de estos materiales quedan reflejadas en la tabla 3.

Tabla 3. 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 ²
Temperatura de fusión	340	340	340	220	255	°C
Densidad	1.31	1.51	1.41	1.14	1.29	g/cm ³
Coefficiente de expansión térmica (<150°C)	50x10 ⁻⁶	30x10 ⁻⁶	25x10 ⁻⁶	90x10 ⁻⁶	50x10 ⁻⁶	m/m/k
Coefficiente de expansión térmica (>150°C)	110x10 ⁻⁶	65x10 ⁻⁶	55x10 ⁻⁶	105x10 ⁻⁶	60x10 ⁻⁶	m/m/k

Se prepararon probetas de 50 mm de diámetro y 100 mm de longitud a partir de perfiles 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 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 figura 1.

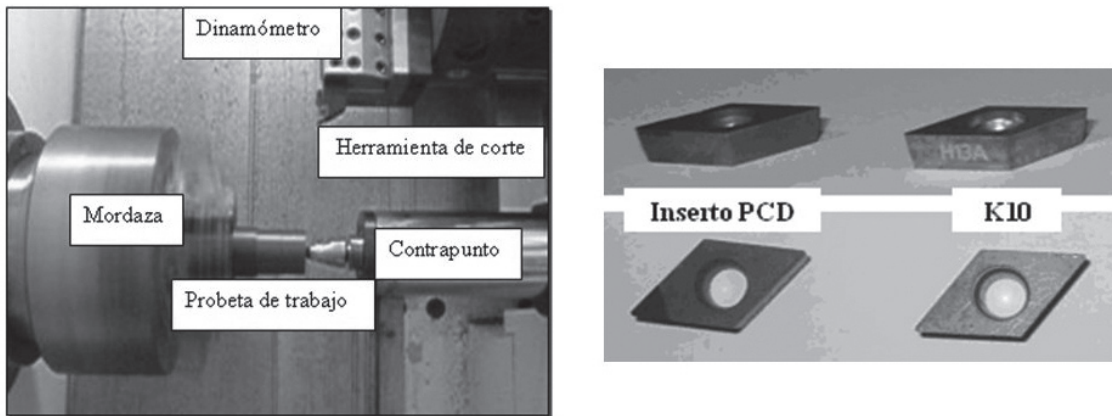


Figura 1. Torno CNC “MHP Kingsbury®” y herramientas utilizadas en los ensayos

Los ensayos se desarrollaron sin refrigeración y utilizando las velocidades de corte y de avance reflejadas en la tabla 2, con una profundidad de pasada constante de 2mm.

Para la adquisición de las fuerzas de corte se ha utilizado un dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9121. El control de los espesores de viruta se ha realizado con un micrómetro digital Mitutoyo® con una amplitud 0-25mm y sensibilidad 0.001mm. Finalmente, la medida de la rugosidad de las superficies mecanizadas se ha materializado con un rugosímetro Hommeltester – T 1000.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza (ANOVA)

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.

Con el fin 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%.

Esta técnica estadística se ha aplicado para los tres materiales estudiados y los dos tipos de herramientas utilizadas (K10 y PCD), sobre los resultados de las fuerzas de corte (F_m , P_c , K_s) y el acabado superficial (R_a).

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

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

$$P_c = F_c \times V_c \quad (2)$$

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

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

Tabla 4. ANOVA para la fuerza de mecanizado

Material	Fuente de variación	SDC		GI		Varianza		Test F		$F_{\alpha} = 5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
PEEK	V_c	177,3	120,48	2	88,64	60,24	19,15	51,78	6,94	3,2	2		
	V_a	5.008	5.645	2	2.504	2.823	541,06	2.613,4	6,94	94,9	96,1		
	Int.	64,69	103,6	4	32,34	51,81	6,98	47,97	0	0,9	1,7		
	Error	18,51	5,3	4	4,6	1,08	/	/	/	0,7	0,1		
	Total	5.269	5.874	8	/	/	/	/	/	100	100		
PEEK GF30	V_c	528,5	734,6	2	264,2	367,3	26,66	16,74	6,94	4,9	5,7		
	V_a	9.745	11.375	2	4.873	5.687,3	492	259,14	6,94	94,2	92,7		
	Int.	13,08	24,17	4	6,54	12,08	0,66	0,55	0	0,3	0,5		
	Error	39,64	87,78	4	9,91	21,94	/	/	/	0,8	1,4		
	Total	10.327	12.221	8	/	/	/	/	/	100	100		
PEEK GF30	V_c	59,4	384,5	2	29,7	192,26	3,8	1,05	6,94	0,7	0,2		
	V_a	6.240	7.295	2	3.120	3.647,4	399,44	19,92	6,94	97,6	79,9		
	Int.	49,48	256,9	4	24,74	128,4	3,16	0,7	0	0,3	5,5		
	Error	31,24	732,3	4	7,81	183,07	/	/	/	1,0	16,9		
	Total	6.380	8.669	8	/	/	/	/	/	100	100		

SDC – Suma de cuadrados, GI –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

La tabla 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 los resultados se puede observar que la velocidad de avance es significativa siempre sobre la variable dependiente ($\text{Test } F > F_{\alpha} = 5\%$ y $P(\%) > \text{error}$). La velocidad de corte no llega a serlo en todos los casos (en particular en el PEEK GF30). 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 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 claramente cómo la velocidad de avance presenta porcentajes muy elevados en comparación con la velocidad de corte y, de acuerdo con la tabla 4, afecta significativamente a los resultados. Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas. Por otra parte, el error representa un porcentaje bajo o muy bajo.

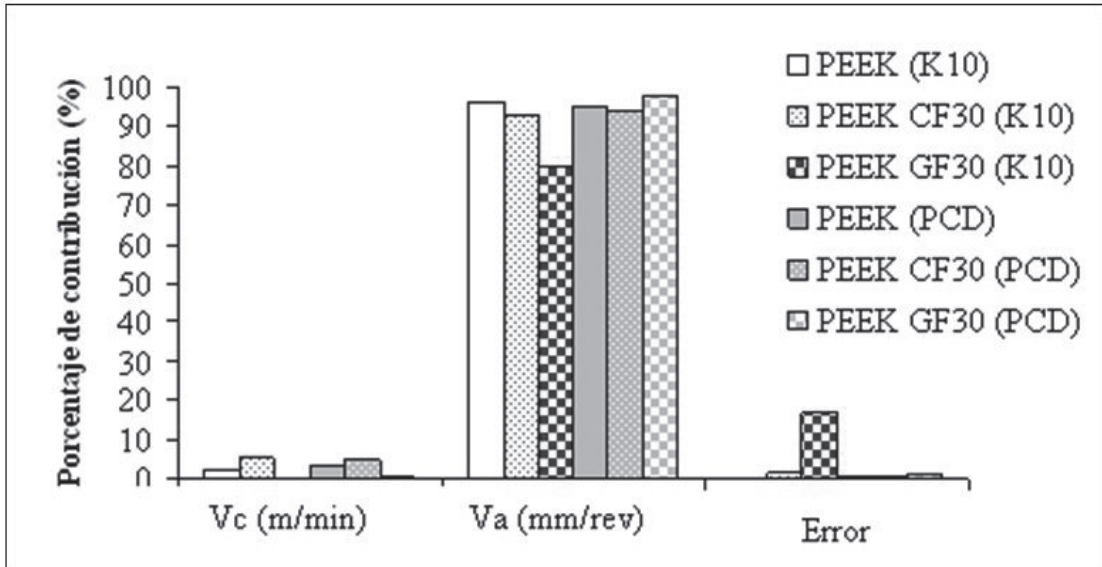


Figura 2. Representación de los porcentajes de contribución: fuerza de mecanizado.

Tabla 5. ANOVA para la potencia de corte

Material	Fuente de variación	SDC		GI		Varianza		Test F		F _α = 5%		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
PEEK	V _c	34.598	39.344	2		17.299	19.672	17,47	18,41	6,94		54,1	54,9
	V _a	18.965	21.029	2		9.482	10.515	9,58	9,84	6,94		28,1	27,9
	Int.	2.822,3	3.121	4		1.411	1.560,5	1,42	1,46	0		1,9	1,7
	Error	3.961	4.274	4		990,1	1.068,4	/	/	/		13,1	12,6
	Total	60.345	67.768	8		/	/	/	/	/		100	100
PEEK CF30	V _c	41.250	46.593	2		20.625	23.296	17.68	17,24	6,94		42,2	42,5
	V _a	39.613	44.566	2		19.807	22.282	16,98	16,49	6,94		40,4	40,5
	Int.	6.660	6.733	4		3.330	3.367	2,85	2,49	0		2,2	1,3
	Error	4.666,4	5.504	4		1.167	1.351	/	/	/		10,1	10,5
	Total	92.189	103.296	8		/	/	/	/	/		100	100
PEEK GF30	V _c	50.868	68.447	2		25.434	34.224	23,35	13,86	6,94		54,9	52,9
	V _a	39.217	33.761	2		14.609	16.880	13,41	6,84	6,94		30,5	24,0
	Int.	4.315	7.973	4		2.158	3.986	1,98	1,61	0		0,0	1,6
	Error	4.357,2	9.874	4		1.089	2.468,4	/	/	/		9,8	16,4
	Total	88.758	120.055	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, GI –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

La tabla 5 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la potencia de corte (P_c). 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 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 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 ($P_c = F_c \cdot V_c$). Se aprecian ligeras diferencias entre materiales y herramientas.

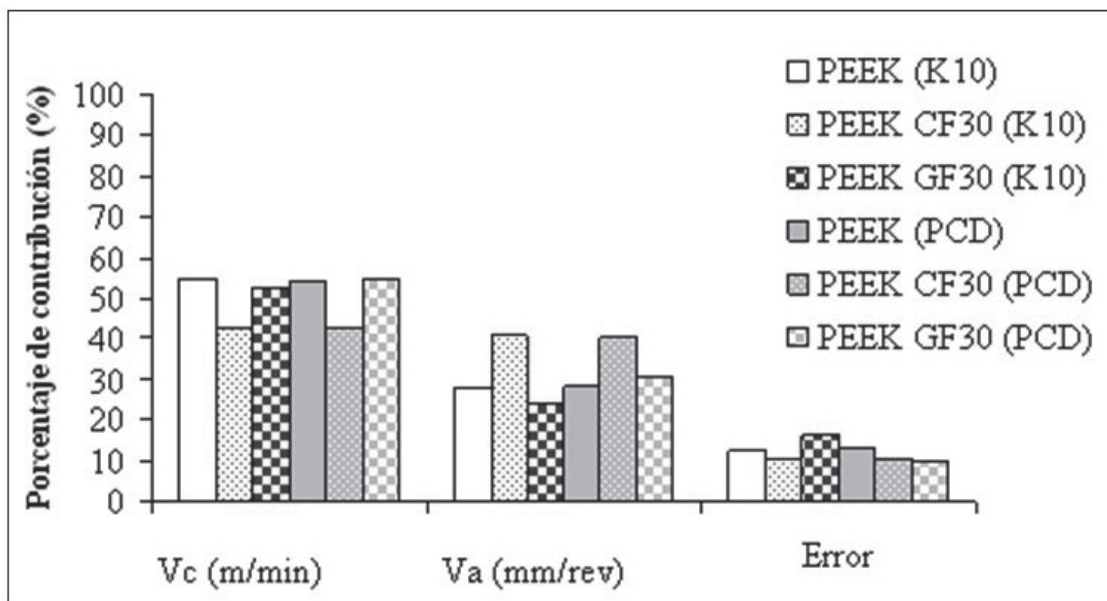


Figura 3. Representación de los porcentajes de contribución: potencia de corte

Tabla 6. ANOVA para la fuerza específica de corte

Material	Fuente de variación	SDC		GI		Varianza		Test F		F $\alpha=5\%$		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
PEEK	V _c	11.927	9.611,8	2		5.963	4.806	3,78	4,49	6,94		12,9	10,6
	V _a	43.497	48.719	2		21.749	24.360	13,8	22,77	6,94		59,2	65,8
	Int.	6.387	8.145	4		3.193	4.072	2,02	3,80	0		0,1	5,5
	Error	6.304	4.279	4		1.576,1	1.070	/	/	/		18,5	12,1
	Total	68.115	70.755	8		/	/	/	/	/		100	100
PEEK CF30	V _c	1.889,4	3.601	2		944,7	1.800	1,64	1,96	6,94		4,6	7,7
	V _a	11.599	15.094	2		5.800	7.547	10,09	8,21	6,94		65,6	58,0
	Int.	147,1	472,9	4		73,57	236,4	0,12	0,57	0		13,5	14,0
	Error	2.300	3.677	4		574,9	919,2	/	/	/		18,9	32,2
	Total	15.936	22.845	8		/	/	/	/	/		100	100
PEEK GF30	V _c	1.141	1.701	2		570,4	850,5	8,40	0,25	6,94		3,2	7,2
	V _a	29.970	54.408	2		14.985	27.203	220,6	7,9	6,94		94,3	66,1
	Int.	245,2	2.047	4		122,6	1.024	1,8	0,29	0		0,1	16,3
	Error	271,6	13.777	4		67,91	3.444	/	/	/		1,7	38,3
	Total	31.628	71.934	8		/	/	/	/	/		100	100

SDC – Suma de cuadrados, GI –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

La tabla 6 muestra los resultados del análisis de varianza sobre la fuerza específica de corte (K_s). Se puede apreciar cómo la velocidad de avance es significativa sobre la variable dependiente (Test $F > F_{\alpha=5\%}$ y $P(\%) > \text{error}$). La velocidad de avance no llega a ser significativa en casi ningún caso. 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 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 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 medio representa un porcentaje en general bajo.

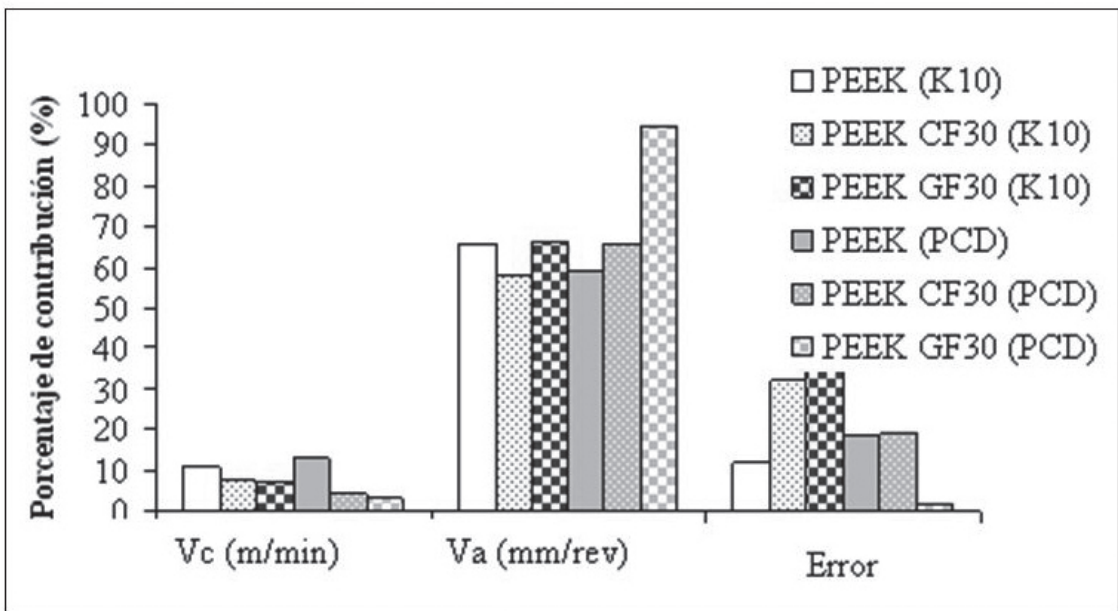


Figura 4. Representación de los porcentajes de contribución: fuerza específica de corte

Tabla 7. ANOVA para rugosidad media

Material	Fuente de variación	SDC		GI		Varianza		Test F		F _α = 5%		P (%)	
		PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10	PCD	K10
PEEK	V _c	0,032	0,01	2		0,016	0,008	23,71	8,42	6,94		0,2	0,6
	V _a	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
PEEK CF-30	V _c	0,03	0,02	2		0,019	0,01	13,30	14,9	6,94		0,5	0,2
	V _a	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
PEEK GF-30	V _c	0,029	0,10	2		0,014	0,05	9,88	573	6,94		0,5	0,9
	V _a	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, GI –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

La tabla 7 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 los resultados de 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_α=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 figura 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 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.

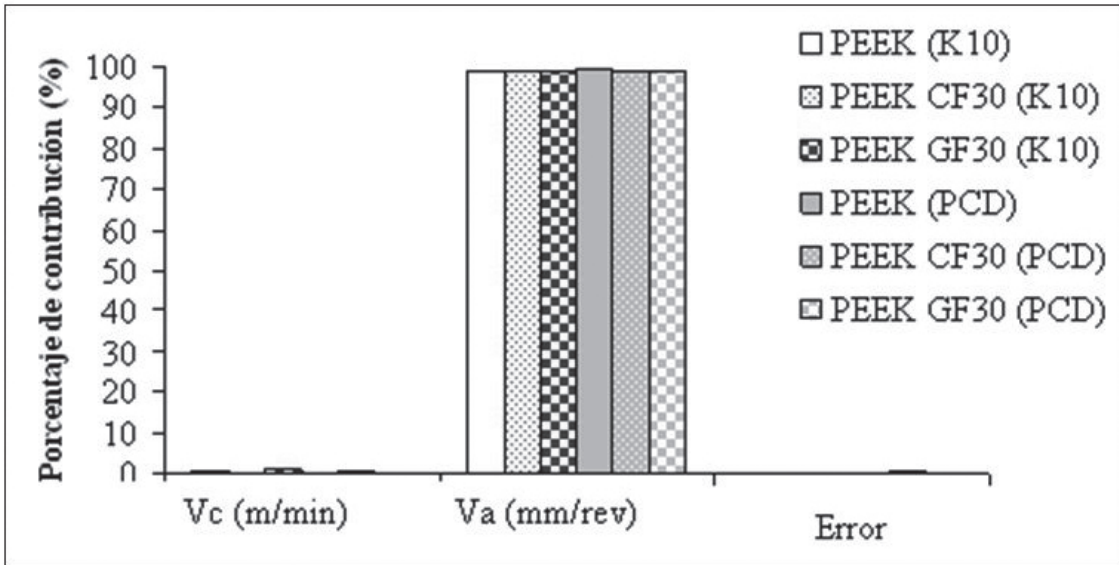


Figura 5. Representación de los porcentajes de contribución: Rugosidad media (Ra)

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 , Ra) 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. La expresión general viene dada por:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n + \varepsilon \quad (4)$$

Siendo, Y la variable dependiente, x_i las variables independientes, α_i son coeficientes y ε el error.

De este modo, se obtendrán expresiones de la forma:

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

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

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

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

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

Siendo ϕ_i funciones lineales.

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) estudiados (tablas 8 a 11). En todos los casos se han obtenido valores de $R > 0,95$.

Tabla 8. Modelos de predicción para la fuerza de mecanizado

Material	Hr.	Modelos de predicción F_m
PEEK	PCD	$F_m = 31,39 - 0,039 \times V_c + 378,27 \times V_a$ (5)
	K10	$F_m = 30,31 - 0,028 \times V_c + 401,31 \times V_a$ (6)
PEEK CF30	PCD	$F_m = 37,33 - 0,122 \times V_c + 526,36 \times V_a$ (7)
	K10	$F_m = 42,15 - 0,144 \times V_c + 568,46 \times V_a$ (8)
PEEK GF30	PCD	$F_m = 40,22 - 0,024 \times V_c + 422,2 \times V_a$ (9)
	K10	$F_m = 52,72 - 0,069 \times V_c + 456,44 \times V_a$ (10)

V_c : velocidad de corte (m/min)

V_a : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 9. Modelos de predicción para la potencia de corte

Material	Hr.	Modelos de predicción P_c
PEEK	PCD	$P_c = -73,81 + 0,986 \times V_c + 735,62 \times V_a$ (11)
	K10	$P_c = -81,33 + 1,055 \times V_c + 775,11 \times V_a$ (12)
PEEK CF30	PCD	$P_c = -112,76 + 1,084 \times V_c + 1057,77 \times V_a$ (13)
	K10	$P_c = -116,98 + 1,152 \times V_c + 1123,5 \times V_a$ (14)
PEEK GF30	PCD	$P_c = -103,12 + 1,205 \times V_c + 912,35 \times V_a$ (15)
	K10	$P_c = -116,08 + 1,39 \times V_c + 982,1 \times V_a$ (16)

V_c : velocidad de corte (m/min)

V_a : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 10. Modelos de predicción para la fuerza específica de corte

Material	Hr.	Modelos de predicción K_s
PEEK	PCD	$K_s = 473,21 - 0,248 \times V_c - 1050,40 \times V_a$ (17)
	K10	$K_s = 478,27 - 0,187 \times V_c - 1071,38 \times V_a$ (18)
PEEK CF30	PCD	$K_s = 394,16 - 0,172 \times V_c - 430,71 \times V_a$ (19)
	K10	$K_s = 442,73 - 0,253 \times V_c - 502,64 \times V_a$ (20)
PEEK GF30	PCD	$K_s = 473,605 - 0,154 \times V_c - 894,42 \times V_a$ (21)
	K10	$K_s = 563,75 - 0,201 \times V_c - 1207,04 \times V_a$ (22)

V_c : velocidad de corte (m/min)

V_a : velocidad de avance (mm/rev)

Tabla 11. Modelos de predicción para la rugosidad media

Material	Hr.	Modelos de predicción R_a
PEEK	PCD	$R_a = -0,681 - 9,476 \times 10^{-4} \times V_c + 19,538 \times V_a$ (23)
	K10	$R_a = -1,266 - 4,761 \times 10^{-4} \times V_c + 27,652 \times V_a$ (24)
PEEK CF30	PCD	$R_a = -0,276 - 1,042 \times 10^{-3} \times V_c + 15,7 \times V_a$ (25)
	K10	$R_a = -0,386 - 8,761 \times 10^{-4} \times V_c + 17,509 \times V_a$ (26)
PEEK GF30	PCD	$R_a = -0,291 - 8,857 \times 10^{-4} \times V_c + 19,242 \times V_a$ (27)
	K10	$R_a = 0,227 - 1,647 \times 10^{-3} \times V_c + 17,509 \times V_a$ (28)

V_c : velocidad de corte (m/min)

V_a : velocidad de avance (mm/rev)

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 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 era de esperar.

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:

$$Error(\%) = \frac{|V_m - V_{exp}|}{V_{exp}} \times 100 \quad (29)$$

siendo, V_m el valor obtenido aplicando modelo (Ecs. 5 a 28) y V_{exp} el valor experimental.

La tabla 12 presenta los parámetros de corte utilizados en los ensayos o tests de confirmación.

Tabla 12. 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

Las tablas 13 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.

Tabla 13. Validación del modelo experimental: fuerza de mecanizado

Material	Ensayo	Fuerza de mecanizado (F_m) (N)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PEEK		PCD	K10	Ec. 36	Ec. 37	PCD	K10
	1	80,41	87,98	80,33	84,90	0,0004	3,5
	2	87,86	91,68	84,23	87,70	4,1	4,3
	3	87,54	91,65	86,18	89,10	1,5	2,7
PEEK CF30		PCD	K10	Ec. 38	Ec. 39	PCD	K10
	1	93,45	97,17	91,88	98,61	1,6	1,4
	2	112,14	127,26	104,08	113,01	7,1	11,1
	3	110,58	119,46	110,18	120,21	0,003	0,006
PEEK GF30		PCD	K10	Ec. 40	Ec. 41	PCD	K10
	1	100,17	112,35	98,75	107,38	1,4	4,4
	2	101,79	114,97	101,15	114,28	0,006	0,006
	3	102,30	125,19	102,35	117,73	0,0004	5,9

* Media de 2 medidas

Tabla 14. Validación del modelo experimenta: potencia de corte

Material	Ensayo	Potencia de corte (P_c) (W)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PEEK		PCD	K10	Ec. 42	Ec. 43	PCD	K10
	1	258,97	283,78	233,73	245,93	9,7	13,3
	2	139,72	145,08	135,3	140,43	3,1	3,2
	3	68,55	70,21	85,83	87,68	25,2	24,8
PEEK CF30		PCD	K10	Ec. 44	Ec. 45	PCD	K10
	1	291,77	301,10	262,70	281,94	9,9	6,3
	2	170,17	194,85	154,30	166,74	9,3	14,4
	3	78,53	86,15	100,10	109,14	27,4	26,6
PEEK GF30		PCD	K10	Ec. 46	Ec. 47	PCD	K10
	1	304,5	345,25	274,73	309,23	9,7	10,5
	2	150,55	173,90	154,23	170,23	2,4	2,1
	3	78,29	92,01	93,98	100,73	20	9,4

* Media de 2 medidas

Tabla 15. Validación del modelo experimental: fuerza específica

Material	Ensayo	Fuerza específica de corte (K_s) (N/mm ²)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PEEK		PCD	K10	Ec. 48	Ec. 49	PCD	K10
	1	259,23	284,07	266,05	280,16	2,6	1,3
	2	280,57	291,33	290,85	298,86	3,6	2,5
	3	275,30	281,97	303,25	308,21	10,1	9,3
PEEK CF30		PCD	K10	Ec. 50	Ec. 51	PCD	K10
	1	291,97	301,40	295,15	316,77	1,08	5,09
	2	341,70	391,27	312,35	342,03	8,5	12,5
	3	315,40	345,97	320,95	354,68	1,7	2,5
PEEK GF30		PCD	K10	Ec. 52	Ec. 53	PCD	K10
	1	304,80	345,60	308,63	342,49	1,2	0,008
	2	302,30	349,20	324,03	362,59	7,1	3,8
	3	314,43	369,53	331,72	372,64	5,4	0,008

* Media de 2 medidas

Tabla 16. Validación del modelo experimental: rugosidad media

Material	Ensayo	Rugosidad media (R_a) (μm)					
		Valor experimental *		Modelo experimental		Error (%)	
PEEK		PCD	K10	Ec. 54	Ec. 55	PCD	K10
	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
PEEK CF30		PCD	K10	Ec. 56	Ec. 57	PCD	K10
	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
PEEK GF30		PCD	K10	Ec. 58	Ec. 59	PCD	K10
	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

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 cómo 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. 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, $F > F_{\alpha}$ = 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 BIBLIOGRÁFICAS

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*, 24, 2245-2250.

Alexis, J. (1995). Pratique industrielle de la méthode Taguchi, les plans d'expériences, AFNOR, France, 1-143.

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*, 35 (5), 701-716.

Burris, D.L., Sawyer, W.G. (2007). Tribological behaviour of PEEK components with compositionally graded PEEK/PTFE surfaces, *Wear*, 62, 220-224.

Davim, J.P., Marques, N. (2001). Evaluation of tribological properties of polymeric materials for hip prosthesis applications, *Tribology Letter*, 1, 91-94.

De Almeida, A.J. (2001). Introdução ao delineamento de experimentos, Edgard Blücher Ltda., Brasil.

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*, 38, 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*, 22, 403-408.

Kaw, A. (1997). Mechanics of composite materials, CRC Press.

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*, 139-148.

Ozden, S., Charayev, A.M., Shaon, A.H. (1999). The synthesis of polyetheretherketones and investigations of their properties, *Journal of Material Science*, 34, 2741-2744.

Rae, P.J., Brown, E.N., Orlor, E.B. (2007). The mechanical properties of poly(ether-etherketone) (PEEK) with emphasis on the large compressive strain response, *Polymer*, 48 (2), 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*, 89-90, 292-297.

Rahman, M., Ramakrishna, S., Thoo, H.C. (1999-b). Machinability study of carbon/PEEK composites, *Machin. Science Technology*, 49-59.

Ross, P.J. (1996). Taguchi techniques for quality engineering, loss function, McGraw Hill, New York, pp. 43-151.

Sinmazcelik, T., Yilmaz, T. (2007). Thermal aging effects on mechanical and tribological performance of PEEK and short fiber reinforced PEEK composites, *Materials and Design*, 28, 641-648.

Voss, H., Friedrich, K. (1987). On the wear behaviour of short-fibre-reinforced PEEK composites, *Wear*, 116, 1-18.

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*, 43, 1015-1022.

Zhang, Z., Breidt, C., Chang, L., Friedrich, K. (2004). Wear of PEEK composites related to their mechanical performances, *Tribology International*, 37, 271-277.