

MODELACIÓN DE LA PRESIÓN ESPECÍFICA DE CORTE EN EL PROCESO DE MICROFRESADO

Iván La Fé Perdomo, Marcelino Rivas Santana, Ramón Quiza

*Centro de Estudios de Fabricación Avanzada y Sostenible, (CEFAS)
Universidad de Matanzas, Autopista a Varadero km 3½, Matanzas 44740, Cuba.*

Resumen: El creciente aumento de los procesos de micro mecanizado, especialmente el micro-fresado, está motivado por la variedad de elementos de configuración compleja que pueden ser obtenidos a través de estas operaciones, especialmente para las ramas de la medicina (implantes) y de la industria aeroespacial (componentes). En este trabajo se propone la modelación de la presión específica de corte (k_c) en el micro-fresado de ranuras de Ti6Al4V. Los valores obtenidos por el método tradicional permitieron el ajuste de un modelo basado en regresión no lineal, a partir de una serie de datos recolectados experimentalmente, que relacionan la k_c con los parámetros del régimen de corte, específicamente el avance. Los resultados alcanzados fueron comparados con los reportados en otras investigaciones consultadas acerca del tema en estudio.

Palabras claves: Micro-fresado, presión de corte específica, parámetros de corte

Abstract: The rising increase of the micromachining processes, especially the micro-milling, is motivated by the variety of elements of complex configuration that can be obtained through these operations, especially in the areas of medicine (implants) and aerospace industry (components). In this work is proposed the modeling of the specific cutting pressure (k_c) on the slots micro-milling of Ti6Al4V. The values obtained by the traditional method allowed the adjustment of a model based on non-linear regression, from a set of data collected experimentally, that relate the k_c to the parameters of the cutting regime, specifically the feed rate. The achieved results were compared with those reported in other researches consulted about the subject under study.

Keywords: Micro-milling, specific cutting force, cutting parameters

1. Introducción.

La precisión en la estimación de la fuerza de corte en los procesos de maquinado depende del modelo de fuerzas desarrollado y del procedimiento para la determinación de los coeficientes específicos de corte [1]. Varios estudios han sido enfocados en la obtención de esa presión específica de corte [2-4].

La presión específica de corte, k_c , recoge la relación de la fuerza de corte con la sección de la viruta, según se indica en la ec. 1:

$$k_c = \frac{F_c}{A_{chip}} = \frac{F_c}{f_z \cdot a_p}, \quad (1)$$

En el micro-fresado un buen ajuste de estos coeficientes de corte es una tarea difícil debido a los valores pequeños de espesores de viruta, donde la presión específica de corte aumenta de forma no-lineal. A este comportamiento no-lineal es lo que se le conoce como efecto-tamaño [1, 5]. De acuerdo con Liu y coautores [6], este fenómeno afecta considerablemente la dinámica del proceso y el acabado superficial de las piezas elaboradas.

Las funciones que se han considerado para la relación de la presión específica con el espesor de la viruta han sido constantes, lineales, polinómicas y potenciales, incluso algunos investigadores han optado por considerar la k_c como un valor constante [7, 8], ya que de esta forma es posible obtener una relación analítica exacta que facilita el cálculo de las fuerzas. Sin embargo el procedimiento que mejor ajuste ofrece es aquel en el que la presión específica de corte tiene una relación de tipo potencial con el espesor de la viruta [3, 8-10]:

$$k_c = k_{c_0} h^{-m_c}, \quad (2)$$

donde, h es el espesor de la viruta y k_{c_0} y m_c son constantes a determinar para una combinación de material pieza-herramienta dada.

Budak y colaboradores [11] demuestran que cuando se estiman las fuerzas de corte basándose en la k_c , los resultados no difieren mucho si estos coeficientes se han obtenido a partir de modelos clásicos (basado en planos de deslizamiento), o bien a partir de la determinación de estos coeficientes a distintos avances para cada par herramienta-material a mecanizar.

Según Gonzalo y coautores [12] el método más empleado para el cálculo de la k_c en el fresado es el de promediar las fuerzas de corte medidas en operaciones de ranurado para diferentes avances por dientes. En este trabajo se propone la modelación de este coeficiente para dos herramientas de corte diferentes y en la aleación de titanio (Ti6Al4V), el cual es un material muy usado en la rama de la medicina y en la industria aeroespacial, además se presenta un estudio ANOVA para ver la sensibilidad de los parámetros del régimen de corte sobre la k_c .

2. Materiales y métodos.

El proceso estudiado es el microfresado de ranuras de la aleación de titanio grado 5, Ti6Al4V. La misma tiene una composición química de: Ti (88,8%), Al (6,62%), V (4,55%), Fe (0,02%), Zr (0,03%), O (0,55%), N (0,5%) y H (0,3%); con una dureza de 107,7 HRB.

Los experimentos se realizaron en un centro de maquinado de tres ejes Kern Evo con velocidad máxima de rotación del husillo de 50 000 min^{-1} . Las fuerzas de corte en las direcciones (x,y,z) fueron captadas por una plataforma dinamométrica con una rango para las mediciones de -250...250 N. Las señales de los datos fueron amplificadas e introducidas en una tarjeta de adquisición de datos *National Instruments* NI PXI 6251, con una frecuencia de muestreo de 50 kHz, y fueron procesadas en el controlador adjunto *National Instruments* PXI-8187. Las

herramientas empleadas tienen dos filos de corte y diámetros (ϕ) de 0,5 mm y 1,0 mm (ver Fig.1), en todos los casos.



Figura 1. Equipamiento experimental

La velocidad de corte (v_c), se mantuvo constante, el avance por diente (f_z) y la profundidad de corte a_p , fueron seleccionadas como variables independientes, mientras que, la presión de corte específica (k_c) y la fuerza de corte (F_c) son las variables de salidas (ver Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Niveles de los factores ($\phi = 0,5\text{mm}$, $v_c = 72\text{ m/min}$)

Factores	Puntos experimentales			
	1	2	3	4
Avance, f_z ($\mu\text{m}/\text{diente}$)	5	10	15	20
Profundidad de corte, a_p (μm)	13	20	27	34

Tabla 2. Niveles de los factores ($\phi = 1,0\text{ mm}$, $v_c = 90\text{ m/min}$)

Factores	Puntos experimentales			
	1	2	3	4
Avance, f_z ($\mu\text{m}/\text{diente}$)	25	30	35	40
Profundidad de corte, a_p (μm)	70	90	110	130

Una vez realizados los experimentos (aleatoriamente) se hizo un análisis de varianza (ANOVA), considerando 3 réplicas para cada punto experimental y un 95% de confiabilidad. Con el objetivo de eliminar la influencia del desgaste de la herramienta en los resultados de salida, se emplearon herramientas nuevas para cada experimento.

3. Análisis de los resultados.

Para validar la influencia del avance por diente y la profundidad de corte sobre la k_C , se muestra en la Tabla 3 el análisis de varianza (ANOVA) de los datos obtenidos para ambas herramientas.

Tabla 3. Análisis de varianza para ambas herramientas

Fuente	$\phi = 0,5 \text{ mm}$					$\phi = 1,0 \text{ mm}$				
	SC	GL	CM	F-ratio	P-value	SC	GL	CM	F-ratio	P-value
f_z	3,33	3	$1,11 \cdot 10^8$	13,43	0,0000	$877,9 \cdot 10^3$	3	$292,62 \cdot 10^3$	4,2	0,0111
a_p	1,54	3	$5,14 \cdot 10^7$	6,22	0,0014	$826,3 \cdot 10^3$	3	$275,42 \cdot 10^3$	3,95	0,0145
Residual	3,39	41	$8,27 \cdot 10^6$			$2,86 \cdot 10^6$	41	$69,72 \cdot 10^3$		
Total	8,26	47				$4,56 \cdot 10^6$	47			

SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de Libertad, CM: Cuadrados medios

El análisis de varianza demuestra que tanto el avance por diente como la profundidad de corte tienen un efecto significativo sobre la presión específica de corte, ya que el P-value es menor que el nivel de confiabilidad tomado ($\alpha = 0,05$).

Modelación

Aunque en la sección anterior se haya comprobado que el avance y la profundidad de corte influyen en la presión específica de corte, varios autores [5, 13] aseguran que el comportamiento de la k_C puede ser descrito mediante una función potencial negativa teniendo solo en cuenta el avance por diente de la herramienta (ec.3). Otro estadígrafo empleado para corroborar la afirmación anterior es el coeficiente de correlación de Pearson (PC), el cual da la medida de que variable independiente tiene una mayor influencia sobre la variable de salida (Tabla 4).

$$k_C = k_1 f_z^{-k_2}, \quad (3)$$

Los resultados mostrados indican que el avance tiene mayor influencia sobre la presión de corte que la profundidad y que ambos parámetros son inversamente proporcionales a la variable de respuesta, lo que significa que cuando ambos aumentan, la k_C disminuye.

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson

Variables	$\phi = 0,5 \text{ mm}$	$\phi = 1,0 \text{ mm}$
	PC	PC
f_z	-0,92	-0,86
a_p	-0,35	-0,42

Finalmente se ajustaron los modelos no lineales que describen el comportamiento de la presión específica de corte para las herramientas empleadas (ec.4 y 5). También se exponen los resultados alcanzados con la aplicación de varios estadígrafos asociados a la calidad de los modelos de k_c (ver Tabla 5).

$$k_{C_{05}} = 29459,9 f_z^{-0,565}, \quad (4)$$

$$k_{C_{10}} = 7584,75 f_z^{-0,446}, \quad (5)$$

Tabla 5. Estadígrafos calculados a los modelos

Estadígrafo	$\phi = 0,5$ mm	$\phi = 1,0$ mm
R^2 (%)	96,7	94,6
SEE	0,076	0,026
MAE	0,045	0,016
DWs	2,490	3,271

SEE: error estándar de las estimaciones, MAE: error medio absoluto, DWs: Durbin-Watson

En la figura 2 se pueden observar los gráficos de los modelos ajustados y los intervalos de confianza de cada punto experimental (95% de confiabilidad). De los resultados obtenidos se puede afirmar que son semejantes en cuanto a la forma de los modelos reportados por [5], sin embargo difieren en cuanto a valores, debido a que se emplea otro material y diferentes herramientas de corte.

Como se puede apreciar ambos modelos son capaces de explicar más del 90% de la variabilidad que sufre la variable dependiente, en este caso la presión específica de corte; por otra parte los errores calculados a ambos modelos tienen muy bajos valores lo que indica una buena precisión en las predicciones.

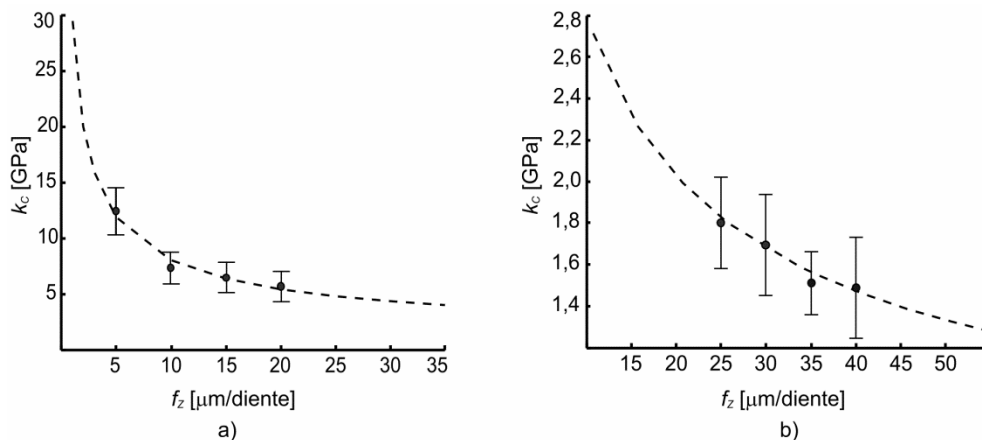


Figura 2. Representación gráfica de los modelos ajustados, a) herramienta de $\phi = 0,5$ mm y b) herramienta de $\phi = 1,0$ mm

4. Conclusiones.

En esta investigación se aproximó la obtención de la presión específica de corte, a partir de una serie de experimentos realizados que permitieron el ajuste de dos modelos exponenciales. Los modelos son presentados en una expresión bastante comprensible y que se ajusta con lo reportado en la bibliografía consultada.

Por otro lado se pudo corroborar el buen ajuste de los modelos, así como la calidad asociada a la precisión de los mismos ya que los errores calculados presentan valores pequeños.

El análisis ANOVA realizado demostró la influencia de los parámetros del régimen de corte sobre la k_C , aunque solo se hallan definidos los modelos en función del avance, debido a que es el factor más decisivo según el coeficiente de Pearson.

Referencias.

- [1] H. Pérez, A. Vizán, J. C. Hernandez, and M. Guzmán, "Estimation of cutting forces in micromilling through the determination of specific cutting pressures," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 190, pp. 18-22, 2007.
- [2] J. Gradišek, M. Kalveram, and K. Weinert, "Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 4, pp. 401-414, 3// 2004.
- [3] H. Y. Feng and C. H. Menq, "The prediction of cutting forces in the ball-end milling process. Part I and part II," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 34, no. 697-719, 1994.
- [4] S. Jayaram, S. G. Kapoor, and R. E. DeVor, "Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic cutting force models," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 2, pp. 265-281, 1// 2001.
- [5] F. Brandão de Oliveira, A. R. Rodrigues, R. Teixeira, and A. Fagali, "Size effect and minimum chip thickness in micromilling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, no. 89, pp. 39-54, 2015.
- [6] X. Liu, K. F. Ehmann, R. E. Devor, and S. G. Kapoor, "The mechanics of machining at the microscale: Assessment of the current state of the science," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, pp. 666-678, 2004.
- [7] F. Abrari and A. Elbestawi, "Closed form formulation of cutting forces for ball and flat end mills," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, no. 1, pp. 17-27, 1997.
- [8] Y. Altintas, A. Spence, and J. Tlustý, "End milling force algorithms for CAD systems," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 31-34, 1991.
- [9] H. Pérez, M. Guzmán, A. Vizán, and J. Pérez, "Modelos de estimación de fuerzas de corte en microfresado," presented at the Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, México, D.F., 2005.
- [10] H. Rezaei, M. H. Sadeghi, and E. Budak, "Determination of minimum uncut chip thickness under various machining conditions during micro-milling of Ti-6Al-4V," *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, vol. 95, pp. 1617-1634, 2018.

- [11] E. Budak, Y. Altintas, and E. Amarego, "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 118, pp. 216-224, 1996.
- [12] O. Gonzalo, J. Beristain, H. Jauregi, and C. Sanz, "A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, no. 50, pp. 765–774, 2010.
- [13] I. S. Kang, J. S. Kim, and Y. W. Seo, "Investigation of cutting force behavior considering the effect of cutting edge radius in the micro-scale milling of AISI 1045 steel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 225, no. 2, pp. 163-171, 2011.