



INFLUENCIA DE LOS MODELOS DE FRICCIÓN EN LA SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DEL MICROFRESADO DE Ti6Al4V

IVÁN LA FÉ PERDOMO¹, CECILIO CANNAVACCILO DÍAZ², MARCELINO RIVAS SANTANA¹, RAMÓN QUIZA¹

¹Universidad de Matanzas

Centro de Estudios de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS)
Autopista a Varadero km 3½ Matanzas CP 44740 (Cuba)

²Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
San Nicolás de los Garza, Nuevo León (México)

(Recibido 29 de junio de 2017, revisado 27 de septiembre de 2017, para publicación 29 de septiembre 2017)

Resumen – El trabajo se dirige a la comparación de la influencia de los modelos de fricción utilizados en la simulación del microfresado de ranuras de la aleación Ti6Al4V por el método de elementos finitos. Se empleó un modelo tridimensional del proceso de corte, con el objetivo de realizar la simulación lo más realísticamente posible, sin sacrificar la eficiencia computacional. Los resultados predichos para la fuerza de corte, a través de la simulación, se compararon con valores experimentales, lo cual permitió determinar tanto el modelo de fricción que más se ajusta al comportamiento real del proceso, como el valor más adecuado del coeficiente de fricción. También se analizó la influencia de los parámetros de corte (velocidad, avance y profundidad axial) en la precisión de las predicciones.

Palabras clave – Simulación, microfresado, método de elementos finitos (MEF), fricción.

1. INTRODUCCIÓN

El microfresado es uno de los procesos más utilizados para la fabricación de microcomponentes, especialmente para las industrias aeroespacial y de componentes médicos [1]. La simulación de dichos procesos reviste especial importancia para la selección de regímenes de trabajo adecuados, lo que evita la realización de experimentos costosos y lentos.

H.B. Wu y S.J. Zhang [2] emplean el método de elementos finitos (MEF) para la simulación de las fuerzas presentes en el proceso de fresado convencional del Ti6Al4V, con fresas de 8 mm de diámetro y un ángulo de la hélice de la herramienta de 20°. Utilizaron la ecuación constitutiva del material, para altas velocidades y deformaciones propuesta por Johnson-Cook (J-C) [3]. La simulación fue llevada a cabo en el *software* ABACUS. El régimen que seleccionaron los autores para su simulación fue: profundidad de corte de 4 mm, una velocidad de rotación de la herramienta de 3000 rev/min y un avance de 600 mm/min. La diferencia entre los resultados reales y la simulación es de un 8,5% respectivamente y las temperaturas máximas rondan alrededor de los 884 °C. En el trabajo se comenta que la ecuación constitutiva del material y los diversos coeficientes utilizados para la conductividad térmica arrojan temperaturas demasiado elevadas y debe analizarse este factor en las siguientes investigaciones.

El *software* Deform 3D fue utilizado por [4], en su investigación sobre la simulación del fresado del acero AISI 420 SS, con una plantilla que el mismo ofrece para ese proceso. Emplearon la ecuación constitutiva propuesta por J-C, con los respectivos coeficientes del material en estudio. Realizaron tres experimentos distintos con el objetivo de comparar las temperaturas reales con las simuladas. Los resultados evidencian una diferencia de prácticamente el 40%. Varias simulaciones por el MEF, utilizando la plantilla para el fresado que propone Deform 3D fueron realizadas también por [5]. En su modelo simplificado, la pieza tiene la forma de un semicírculo (la cual representa el movimiento rotativo de la herramienta de

corte) y la misma se desplaza linealmente. Los resultados de este estudio mostraron un buen ajuste entre las fuerzas simuladas y las obtenidas experimentalmente.

En el campo específico del microcorte, el MEF fue aplicado por [6] al microtorneado ortogonal de AISI D2 con el objetivo de analizar la fuerza de corte, las tensiones de von Mises, la tensión máxima de corte, la deformación plástica y la distribución de la temperatura en la zona de corte. Los resultados obtenidos por la simulación fueron validados por una serie de experimentos realizados.

Algunos de los autores que más han explorado el tema de la simulación del microfresado por el MEF son Thanongsak Thepsonthi y Tugrul Özel. En su investigación [7, 8], modelan el proceso de microfresado con fresas de diámetro de 0,508 mm, en Ti6Al4V de una dureza de 36 HRC. Partiendo de una medición del radio de la herramienta de corte con un microscopio electrónico, determinaron que las fresas sin recubrimiento tienen un radio en la punta de $(3,0 \pm 0,5) \mu\text{m}$ y con recubrimiento de $(5,0 \pm 0,5) \mu\text{m}$. La simulación la realizaron en el *software* Deform2D, utilizaron el modelo de J-C, con los coeficientes reportados por [9]. El tamaño de la malla que recomiendan los autores es de $(0,1 \dots 3,0) \mu\text{m}$. En la publicación muestran los datos de conductividad térmica, capacidad calorífica, expansión térmica y módulo de elasticidad para el Ti6Al4V, además emplean como material de la herramienta el WC/Co y para el recubrimiento, nitruro de boro cúbico (cBN). Todos los contornos de la pieza menos el de acceso de la herramienta son restringidos. Miden el desgaste de la herramienta de corte a lo largo de un recorrido de 600 mm, comparando la variación del mismo con el de la herramienta real.

En el trabajo propuesto por [10], se utiliza el mismo material y un estudio similar al de [7, 8], pero a diferencia de los artículos analizados anteriormente, realizan mediciones experimentales de rugosidad superficial y la rebaba para distintos regímenes de corte, llegando a optimizar estos dos factores. Con la simulación detallan la temperatura y la fuerza máxima en la pieza y la herramienta. Los autores Uriarte y Bueno [11] obtienen los valores de fuerza en el microfresado utilizando el MEF, realizan para ello una medición del radio del filo de la herramienta de corte utilizando un microscopio electrónico, ofrecen datos como: la longitud, el largo de la fresa y el ángulo de la hélice (que para todos los casos es de 30°), de distintas herramientas con diferentes diámetros. Para la simulación seleccionaron la fresa de diámetro 0,4 mm con un radio en el filo de $0,15 \mu\text{m}$, el material que utilizaron fue acero H13 con una dureza de 60 HRC. El principal aporte de este estudio es la propuesta de una metodología para calcular los coeficientes de las fuerzas de corte (los cuales fueron verificados experimentalmente), además se obtienen buenas aproximaciones entre las fuerzas experimentales y las simuladas.

Uno de los factores que más influencia tiene en los resultados de la simulación de procesos de micro-maquinado, es el modelo de fricción seleccionado y los parámetros del mismo [12, 13]. Sin embargo, la selección de dicho modelo no puede realizarse únicamente desde consideraciones teóricas, sino que debe basarse en la concordancia con resultados empíricos [14].

El presente trabajo se propone como objetivo el estudio de la influencia del modelo de fricción (de Coulomb y el de Cizallamiento incluyendo los valores de los respectivos coeficientes) [14-16], en los valores predichos para la fuerza de corte, a través de la simulación del microfresado de Ti6Al4V, utilizando el MEF, y la selección de la variante que mejor se ajusta a los resultados experimentales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Simulación por el método de elementos finitos

La simulación del proceso de microfresado se llevó a cabo utilizando el *software* Deform 3D. Para la misma, se utilizó un modelo geométrico tridimensional (Fig. 1), con el objetivo de reflejar con la mayor realidad posible el proceso de corte.

En la simulación, el material de la pieza (Ti6Al4V) se consideró como perfectamente plástico y su comportamiento se describió a través de un modelo constitutivo de Johnson-Cook dado por la expresión:

$$\sigma = \left[A + B \varepsilon^n \left(\frac{1}{\exp(\varepsilon^a)} \right) \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \left[D + (1 - D) \left[\tanh \left(\frac{1}{(\varepsilon + p)^r} \right) \right]^s \right]; \quad (1)$$

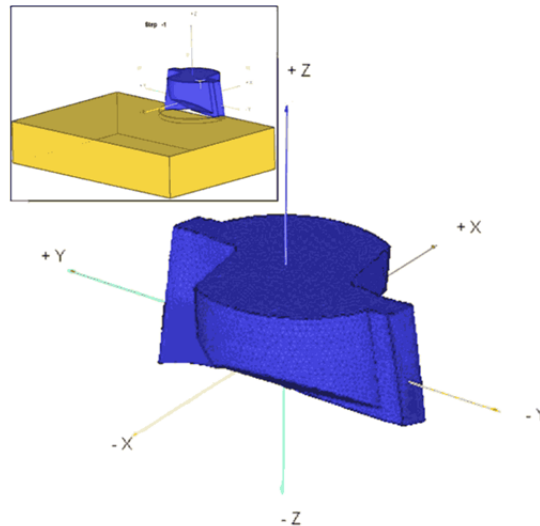


Fig. 1. Modelo geométrico tridimensional utilizado en la simulación.

Tabla 1. Propiedades termo-mecánicas de la herramienta y la pieza.

	<i>Ti6Al4V</i>	<i>WC/Co</i>
Conductividad térmica, ($W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$)	$7,039e^{0,0011 \cdot T}$	55
Capacidad calorífica, ($N mm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$)	$2,24e^{0,0007 \cdot T}$	$0,0005 \cdot T + 2,07$
Densidad, ($g \cdot cm^{-3}$)	4,43	-
Coefficiente de Poisson	0,34	0,22
Módulo de Young, (MPa)	$0,7412 \cdot T + 113,375$	$5,6 \cdot 10^{-6}$
Emisividad	0,7	0,69

cuyos coeficientes fueron tomados de [9]. En este modelo, σ es la tensión de flujo plástico, que depende de la deformación infinitesimal, ε ; de la velocidad de deformación, $\dot{\varepsilon}$; y de la temperatura, T . Las constantes empíricas que determinan el comportamiento del material son el límite de fluencia, $A = 782,7$ MPa; el módulo de endurecimiento por deformación, $B = 498,4$ MPa; el coeficiente de acritud, $n = 0,28$; la sensibilidad a la velocidad de deformación, $C = 0,028$; y el coeficiente de ablandamiento térmico $m = 1$. También aparecen en el modelo, la velocidad de deformación de referencia, $\dot{\varepsilon}_0 = 1s^{-1}$; la temperatura de fusión del material, $T_m = 1450$ °C; y la temperatura ambiente (de referencia), $T_0 = 20$ °C. Finalmente, el último término en la ecuación (2) tiene en cuenta el incremento de la sensibilidad al ablandamiento térmico [8-10, 17]. En el mismo:

$$D = 1 - \left(\frac{T}{T_m} \right)^d ; p = \left(\frac{T}{T_m} \right)^b ; \quad (2)$$

siendo $a = 1$; $s = 0,05$; $r = 2$; $d = 1$; y $b = 5$.

También se tuvieron en cuenta otras propiedades mecánicas y térmicas del material y la herramienta, tal como se muestra en la tabla 1.

Para el mallado se utilizaron elementos tetraédricos, los cuales generaron una densidad correspondiente a una longitud característica de 0,005 mm, en la zona de corte, siendo la malla más gruesa en las regiones lejanas del corte, en aras de ganar en eficiencia computacional (Fig. 2). En la zona de contacto entre la pieza y la herramienta, se utilizó una malla adaptativa y dinámica.

Se establecieron condiciones de frontera de desplazamiento y temperatura, en las superficies de la pieza, con vista a garantizar la adecuada simulación del proceso.

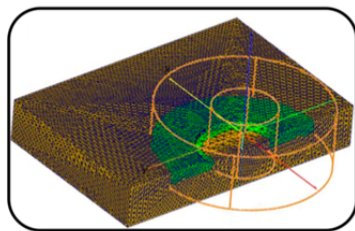


Fig. 2. Representación del mallado en el conjunto pieza-herramienta.

Tabla 2. Niveles del diseño experimental.

<i>Factores experimentales</i>	<i>Niveles</i>		
	Bajo	Medio	Alto
Velocidad de corte, v [m/min]	32	52	72
Avance, f_z [$\mu\text{m}/\text{diente}$]	5	10	20
Profundidad de corte axial, a_p [μm]	13	27	34

Tabla 3. Valores de los coeficientes en los modelos de fricción.

<i>Modelo</i>	<i>Niveles experimentales</i>		
De Coulomb, f_{rC}	0,2	0,4	0,6
Por cizallamiento, f_{rS}	0,3	0,6	0,9

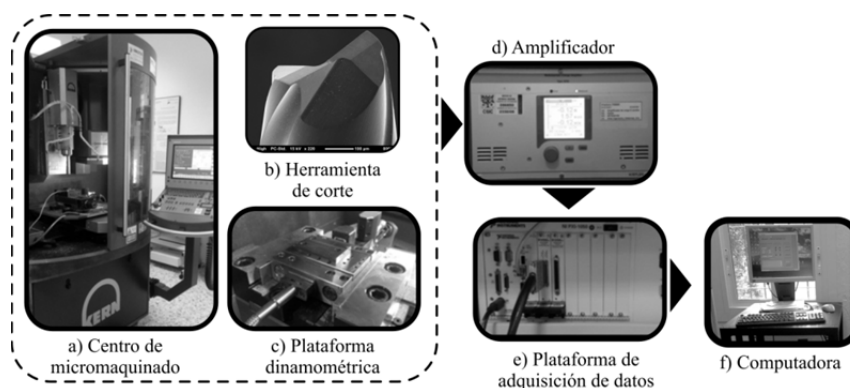


Fig. 3. Equipamiento experimental.

Con el objetivo de estudiar la influencia de los modelos de fricción, bajo diferentes condiciones de corte, se utilizó un diseño experimental de arreglo ortogonal, L9, donde los parámetros de corte se variaron en tres niveles (tabla 2).

Para cada uno de los puntos experimentales, se simuló seis variantes, tres de ellas correspondiendo a los valores del coeficiente de fricción en cada uno de los modelos de fricción considerado (tabla 3).

2.2. Estudio experimental

Para conocer el comportamiento real de la fuerza de corte, se fresaron un grupo de microranuras en la aleación de titanio Ti6Al4V, con una dureza de 107,7 HRB. Las mismas se ejecutaron en un centro de maquinado de tres ejes KERN Evo (Fig. 3a) con una velocidad máxima de rotación del husillo de 50 000 rpm.

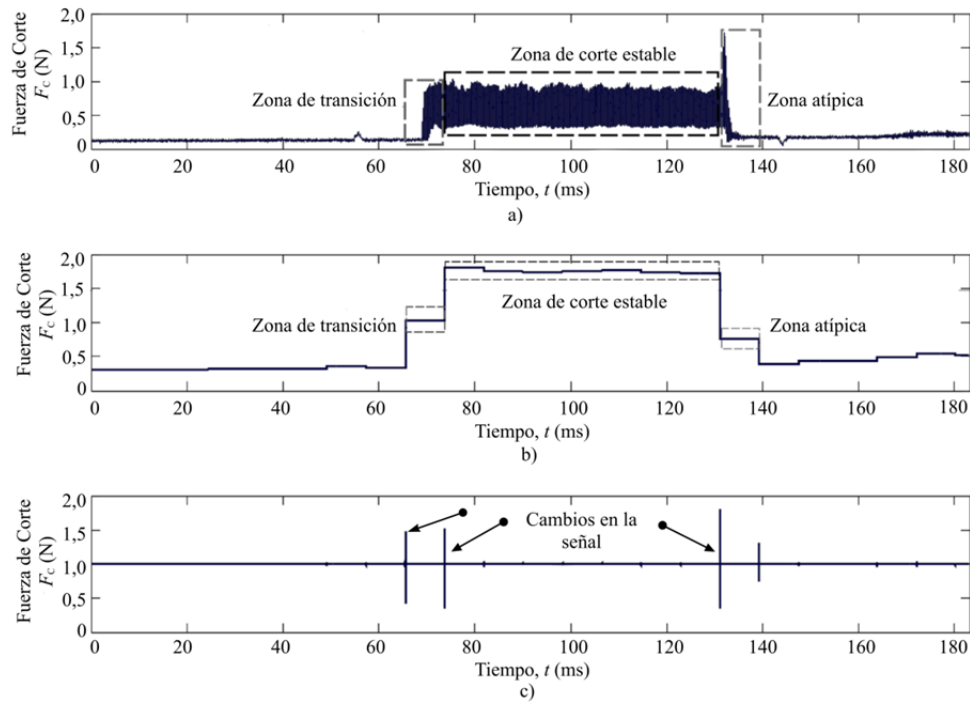


Fig. 4. Procesamiento de la señal de fuerza: a) señal original, b) componente de alta frecuencia, c) componente de baja frecuencia.

La herramienta de corte es de la marca *Union Tools HLS 2005-015 carbide micro-milling cutter* (Fig. 3b), con dos filos de corte y un ángulo de inclinación de la hélice de 30° . Para la medición de las fuerzas de corte se utilizó una plataforma dinamométrica Kistler Minidyn 9256 (Fig. 3c), la que permite captar la fuerza ejercida por la fresa en los tres planos (F_x , F_y , F_z) con una sensibilidad en los ejes (z , x) de 26 pC/N y 13 pC/N en el eje y . Es posible registrar fuerzas de hasta 250 N.

Las componentes de la fuerza de corte fueron medidas con una frecuencia de muestreo, $f_s = 50 \text{ kHz}$. Para el procesamiento experimental de la señal de fuerzas se utilizó la transformada de *wavelet*, obteniendo la zona de corte estable de la máquina herramienta (Fig. 4). Por lo que fue posible descartar valores atípicos en el procesamiento de los datos. La fuerza de corte resultante (3) se determinó para cada punto experimental. Para las simulaciones se varió el avance, la profundidad de corte y la velocidad de corte en 3 niveles (bajo, medio, alto) utilizando una matriz ortogonal L9 como planificación experimental, para un total de 54 simulaciones.

$$F_C = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de las simulaciones, se obtuvieron los valores de la fuerza resultante para las seis variantes de fricción en cada uno de los nueve puntos experimentales (tabla 4). Para evaluar la influencia de cada modelo de fricción y su respectivo coeficiente con respecto al otro, se decidió comparar los resultados con la fuerza resultante (F_C) a través del error relativo el cual se calculó con respecto a la fuerza experimental por la ecuación 4. En la tabla 5 se muestran los errores obtenidos para cada modelo de fricción y su respectivo coeficiente.

$$error = \left(\frac{F_{\text{experimental}} - F_{\text{simulada}}}{F_{\text{experimental}}} \right) \cdot 100\% \quad (4)$$

Tabla 4. Mediciones experimentales y resultados de la fuerza simulada.

Nº Exp.	Régimen			Experi- mental	Fuerza de corte resultante, F_C [N]					
	v [m/min]	f_z [μ m]	a_p [μ m]		Simulada, con coeficiente de fricción					
					(por cizallamiento)			(de Coulomb)		
					0,3	0,6	0,9	0,2	0,4	0,6
1	32	5	13	0,996	0,828	0,842	0,890	0,964	0,938	0,924
2	32	10	27	2,522	1,361	1,425	1,819	1,266	1,371	1,976
3	32	20	34	3,774	2,465	2,672	3,180	2,927	2,757	2,952
4	52	5	27	1,578	1,066	1,141	1,190	1,463	1,300	1,538
5	52	10	34	2,254	2,000	2,211	2,220	2,288	2,165	2,251
6	52	20	13	1,705	0,971	1,025	1,272	1,049	1,242	1,306
7	72	5	34	1,631	1,633	1,798	1,931	1,933	1,872	1,925
8	72	10	13	0,919	0,763	0,912	0,946	0,847	0,924	0,924
9	72	20	27	1,885	1,652	1,622	1,798	1,648	1,710	1,719

Tabla 5. Errores entre las fuerzas experimentales y las simuladas.

Nº Exp.	Régimen			Error relativo, [%]					
	v [m/min]	f_z [mm]	a_p [mm]	(por cizallamiento)			(de Coulomb)		
				0,3	0,6	0,9	0,2	0,4	0,6
				0,3	0,6	0,9	0,2	0,4	0,6
1	32	5	13	16,9	15,5	10,6	3,20	5,90	7,30
2	32	10	27	46,1	43,5	27,9	49,8	45,6	21,7
3	32	20	34	34,7	29,2	15,7	22,4	26,9	21,8
4	52	5	27	32,5	27,7	24,6	7,30	17,6	2,50
5	52	10	34	11,2	1,90	1,50	1,50	3,90	0,10
6	52	20	13	43,1	39,9	25,4	38,5	27,1	23,4
7	72	5	34	0,10	10,2	18,4	18,5	14,8	18,0
8	72	10	13	16,9	0,70	3,00	7,80	0,60	0,60
9	72	20	27	12,4	14,0	4,60	12,6	9,30	8,80
Error medio				23,76	20,28	14,64	17,96	16,87	11,58

Como se aprecia en la tabla 5 los errores de predicción de las simulaciones varían desde un 0,10% hasta un 49 %. Las mejores predicciones se alcanzaron con el modelo de fricción de Coulomb con un coeficiente de 0,6; en este caso ningún error sobrepasó el 23,4 %, lo cual es favorable.

Analizando la influencia de los diferentes modelos y coeficientes de fricción, en la precisión de las predicciones, bajo diferentes condiciones de corte (Fig. 5), se puede constatar que el error disminuye con el incremento de la velocidad y aumenta con el incremento del avance y la profundidad de corte. En todos los casos, no obstante, el modelo de Coulomb con coeficiente de fricción de 0,6 ofrece las mejores predicciones, aunque siguiendo una tendencia similar a la de los otros modelos y coeficientes.

A una conclusión similar se puede llegar observando la superposición de las fuerzas obtenidas de forma experimental y los resultados de la simulación (Fig. 6). Para hacer coincidir cada una, se graficó en el eje y la F_C contra el ángulo de rotación de la herramienta para el corte de un filo. Es posible apreciar que, excepto en los puntos experimentales 2, 3 y 6 (correspondientes a bajas velocidades y altos avances), las simulaciones ofrecen resultados muy similares a los medidos experimentalmente tanto con respecto a la tendencia como a los valores obtenidos.

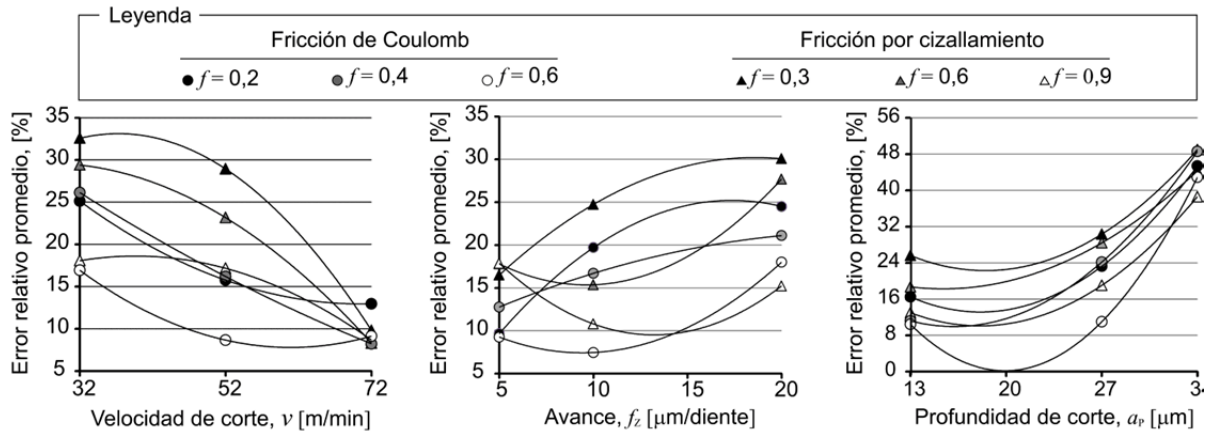


Fig. 5. Influencia del error en los parámetros del régimen de corte.

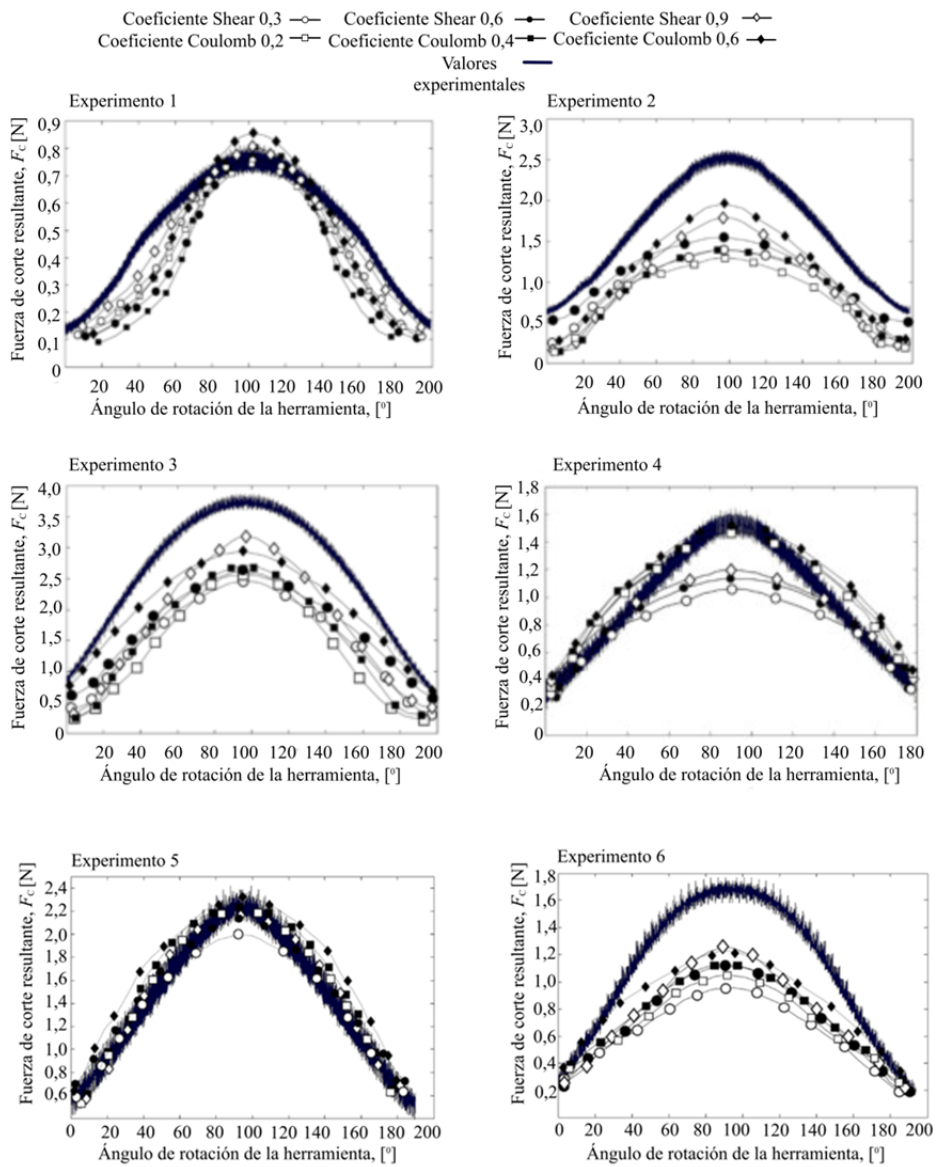


Fig. 6. Representación de las fuerzas experimentales y las simuladas (continua...).

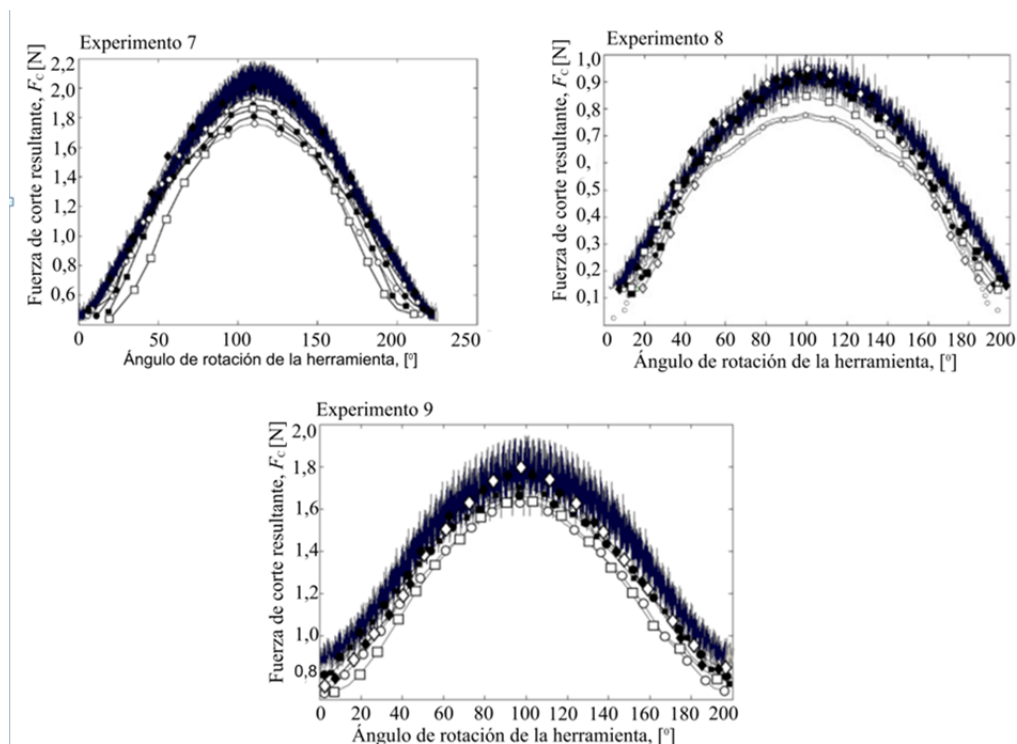


Fig. 6. Representación de las fuerzas experimentales y las simuladas.

4. CONCLUSIONES

Como resultados de la investigación, se llevaron a cabo las simulaciones del proceso de microfresado de ranuras en Ti6Al4V, a través del método de elementos finitos. El estudio se realizó para tres niveles de valores de velocidad de corte, avance y profundidad axial de corte. Para cada uno de los puntos experimentales, se consideraron dos modelos de fricción, con tres valores de coeficiente, cada uno.

En todos los casos, las fuerzas predichas por las simulaciones presentan una buena concordancia con los resultados experimentales, tanto con respecto a la forma funcional como a los valores. La comparación de las diferentes variantes de modelos y coeficientes de fricción, mostró que la que mejores resultados ofrece es el modelo de Coulomb con coeficiente igual a 0,6. La misma tuvo un error máximo de 23,4%, correspondiendo a la velocidad de corte de 52 m/min, el avance de 20 $\mu\text{m}/\text{diente}$ y la profundidad de 13 μm .

También se analizó la influencia de los parámetros de corte en el error de las predicciones, resultando en que el mismo disminuye tanto con el aumento de la velocidad como con la disminución del avance y la profundidad de corte axial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Autónoma de Madrid en el marco del convenio bilateral con la Universidad de Matanzas, especialmente a Rodolfo E. Haber y Gerardo Beruvides por la ayuda ofrecida en la realización de los experimentos.

REFERENCIAS

- [1] Beruvides, G., Castaño, F., Quiza, R. et al., "Surface roughness modeling and optimization of tungsten–copper alloys in micro-milling processes", *Measurement*, **86**, 246–252 (2016)
- [2] Wu, H.B., Zhang, S.J., "3D FEM simulation of milling process for titanium alloy Ti6Al4V", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **8**(5), 1319-1326 (2014)
- [3] Johnson, G.R., Cook, W.H., "A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures", in Proc. 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands (1983)
- [4] Gowtham, G., Dharanidhar, E., Pavan, C.H. et al., "3D Finite Element analysis of milling operation on AISI 420 SS using DEFORM 3D", *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, **2**(1),10-12 (2014)
- [5] Pittalà, G.M., Monno, M., "3D Finite Element modeling of face milling of continuous chip material", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **47**(5), 543–555 (2010)
- [6] Maranhão, C., Silva, L.R., Davim, J.P., "Simulação por elementos finitos com validação experimental no micro-torneamento ortogonal do aço AISI D2", *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, **20**(1), 87-97 (2016)
- [7] Thepsonthi, T., Özel, T., "Experimental and finite element simulation based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Effects of cBN coating on tool wear", *Journal of Materials Processing Technology*, **213**(4),532–542 (2013)
- [8] Thepsonthi, T., Özel, T., "Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **63**(9), 903-914 (2012)
- [9] Özel, T., Sima, M., Srivastava, A.K. et al., "Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations", *CIRP Annals of Manufacturing Technology*, **59**(1), 77-82 (2010)
- [10] Özel, T., Thepsonthi, T., Uluhan, D. et al., "Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti-6Al-4V alloy with uncoated and cBN coated micro-tools", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **60**(1), 85–88 (2011)
- [11] Uriarte, L., Bueno, R., Gonzalo, O. et al., "Mechanistic modelling of the micromilling operation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **222**(1),23-33 (2006)
- [12] Lazoglu, I., Mamedov, A., "Deformation of thin parts in micromilling", *CIRP Annals*, **65**(1),117-120 (2016)
- [13] Li, H., Wu, B., "Development of a hybrid cutting force model for micromilling of brass", *International Journal of Mechanical Sciences*, **115**(Supplement C), 586-595 (2016)
- [14] Oliaei, S.N.B., Karpat, Y., "Investigating the influence of friction conditions on finite element simulation of microscale machining with the presence of built-up edge", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **90**(1), 819-829 (2017)
- [15] Jin, X., Altintas, Y., "Slip-line field model of micro-cutting process with round tool edge effect", *Journal of Materials Processing Technology*, **211**,339–355 (2011)
- [16] Melkote, S.N., Grzesik, W., Outeiro, J. et al., "Advances in material and friction data for modelling of metal machining", *CIRP Annals*, **66**(2),731-754 (2017)
- [17] Özel, T., Liu, X., "Investigations on mechanics based process planning of micro-end milling in machining mold cavities", *Materials and Manufacturing Processes*, **24**(12),1274-1281 (2009)

INFLUENCE OF FRICTION MODELS IN Ti6Al4V MICROMILLING SIMULATION BY USING THE FINITE ELEMENTS METHOD

Abstract – The work is focused to comparing the influence of the friction models used in the simulation of grooves micromilling of Ti6Al4V alloy, by using the finite element method. A tridimensional cutting model was used, for carrying out the simulation process as realistically as possible, without losing computational efficiency. Cutting force predicted outcomes, though simulation, were compared with experimental values, which

allow to determine the most convenient friction model and friction coefficient value. The cutting parameters influence on the prediction accuracy was also analyzed.

Keywords – Simulation, Micro milling, Finite Elements Method (MEF), Friction.