

Modelación por elementos finitos de la fuerza de corte del proceso de microfresado de la aleación de titanio Ti6Al4V

Finite element-based modeling of the cutting force in a micro-milling process of Ti6Al4V titanium alloy

Marcelino Rivas Santana¹, Cecilio Cannavacciolo Díaz², Iván La Fé Perdomo¹

¹ Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas, Cuba. Email: marcelino.rivas@umcc.cu, ivan.lafe@umcc.cu

² Universidad Autónoma de Nueva León (UNAL). México. Email: Cecilio.Cann@yahoo.com

RESUMEN

La aleación de titanio Ti6Al4V es ampliamente utilizada, especialmente en las industrias aeroespacial y de la salud, donde se requieren piezas y componentes pequeños y, en consecuencia, las operaciones de micromaquinado juegan un papel clave. La selección de los parámetros de corte adecuados en el microcorte de aleaciones de titanio es a menudo una tarea compleja, ya que hay poca disponibilidad de modelos confiables y datos experimentales. Este trabajo propone la simulación de un proceso de microfresado de la aleación Ti6Al4V, para obtener un modelo para la fuerza de corte. Se utilizó un enfoque lagrangiano-euleriano arbitrario para simular el comportamiento plástico del sistema de pieza-viruta. También fueron tenidos en cuenta los modelos de fricción y fractura. Se llevaron a cabo simulaciones para nueve condiciones de corte diferentes (correspondientes a un arreglo ortogonal). Se ajustó un modelo de regresión para relacionar los parámetros de corte (velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte axial) con la fuerza de corte resultante. Los resultados obtenidos se compararon con datos experimentales mostrando un error relativo máximo inferior al 25%.

Palabras clave: Microfresado; Aleación Ti6Al4V; Elementos finitos; Fuerza de corte; Modelación.

ABSTRACT

Ti6Al4V titanium alloy is widely used, especially in aerospace and health industries, where small parts and components are required and, consequently, micro-machining operations play a key role. Selecting the proper cutting parameters in micro-cutting of titanium alloys is often a complex task, as there is a lack of reliable models and experimental data. This work proposes the simulation of a micro-milling process of the Ti6Al4V alloy, for obtaining a model for the cutting force. An arbitrary Lagrangian–Eulerian approach was used for simulating the plastic behavior of the workpiece-chip system. Friction and fracture models were also considered. Simulations were carried out for nine different cutting conditions (which correspond to an orthogonal array). A regression model was fitted for relating the cutting parameters (cutting speed, feed per tooth and axial depth of cut) to the resultant cutting force. The obtained outcomes were compared to experimental data showing a maximum relative error lower than 25%.

Keywords: Micro-machining; Ti6Al4V alloy; Finite elements; Cutting force; Modeling.

1. INTRODUCCIÓN

Con el reciente avance en la informática y las telecomunicaciones existe una tendencia bien marcada hacia la miniaturización de componentes y el aumento de las prestaciones de los mismos. Los circuitos eléctricos utilizados en dispositivos móviles, relojes inteligentes y ordenadores son cada vez más pequeños, por lo que a su vez las técnicas tradicionales de fabricación no son capaces de satisfacer esta demanda. Por otro lado, el adelantado avance de las tecnologías vinculadas directamente a la medicina

también está enfocado a la miniaturización de accesorios y dispositivos como marcapasos, micro válvulas, entre otros. Por lo que se han desarrollado técnicas de micro fabricación para satisfacer estas necesidades. El micro fresado es un proceso de fabricación por arranque de viruta, se enmarca dentro del campo de las micro tecnologías, éstas se utilizan con el propósito de fabricar microcomponentes a partir de diversos procesos como pueden ser el mecanizado convencional, la electroerosión, el modelo por inyección, el haz de iones, el mecanizado láser o procesos más específicos de la micro escala como la litografía o la deposición química del vapor. Las micro tecnologías comprenden también el estudio del campo de los micro ensamblajes a grandes o pequeños volúmenes. El micro fresado es un proceso en el que infieren prácticamente todos los fenómenos térmicos y físicos del proceso de fresado convencional y además es necesario tener en cuenta otros aspectos específicos que aparecen en el trabajo a micro escala. En los últimos años, debido a la gran ventaja que presentan, se han desarrollado los métodos de simulación por elementos finitos, siendo muy importante en la modelación y simulación de procesos. El proceso de micro fresado no escapa de esto y la literatura muestra una gran cantidad de artículos en los que se trata el tema.

Wu y Zhang (Wu & Zhang, 2014) utilizan el método de elementos finitos para la simulación de las fuerzas presentes en el proceso de fresado convencional del Ti6Al4V, con fresas de 8 mm de diámetro con un ángulo de la hélice de 20° , utilizaron la ecuación constitutiva del material para altas velocidades y deformaciones propuesta por Johnson y Cook (Johnson & Cook, 1983). La simulación fue llevada a cabo en el software ABACUS. El régimen que seleccionaron los autores para su simulación fue de una 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 %. Gowtham y coautores (Gowtham, Dharanidhar, Pavan, Ashwin, & Prasad, 2014) simularon el fresado del acero AISI 420 SS utilizando el software Deform 3D, emplearon la ecuación constitutiva propuesta por Johnson-Cook 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 arrojan una diferencia de prácticamente el 40%. Pittalà y Monno (Pittalà & Monno, 2010), realizan varias simulaciones por el método de elementos finitos, utilizando el software Deform 3D. El material de la fresa utilizada fue WC-Co con un diámetro de 1.6 mm. Algunos de los autores que más han explorado el tema de la simulación del micro fresado por el método de Elementos Finitos son Thepsonthi y Özel (Thepsonthi & Özel, 2013), en su investigación modelan el proceso de micro fresado con fresas de diámetro de 0.5 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 μm y con recubrimiento de 5 μm . La simulación la realizaron en el software Deform en 2D, utilizaron el modelo de Johnson-Cook. El tamaño de la malla recomendada por los autores es desde 0.1-3 μm . En los trabajos de (Özel, Thepsonthi, Ulutan, & Kaftanoglu, 2011; Thepsonthi & Özel, 2015), realizan mediciones experimentales de rugosidad superficial y la rebaba para distintos regímenes de corte, optimizan estos dos factores. Con la simulación comprueban la temperatura y la fuerza máxima en la pieza y la herramienta. En (Özel et al., 2011), se realiza la simulación por elementos finitos de micro fresas recubiertas con cBN. Los autores (Uriarte, Bueno, Gonzalo, Lopez de la Calle, & Lamikiz, 2006) obtienen los valores de fuerza en el proceso utilizando el método de elementos finitos, ellos realizaron una medición del radio del borde la herramienta, utilizando un microscopio electrónico, ofrecen datos de distintas herramientas con diferentes diámetros.

Los artículos mencionados anteriormente muestran el uso de los elementos finitos para la simulación del proceso de micro fresado, barriendo una parte de los regímenes de trabajo utilizados. El objetivo del trabajo es ampliar las bases de datos utilizando regímenes de corte no registrados en la literatura consultada.

2. METODOLOGÍA

Las micro fresas utilizadas en la investigación son fabricadas por Union Tools de diámetro 0.5 mm, modelo HLS-2005-015 de carburo de tungsteno con recubrimiento HARD MAX, radio del borde cortante

de 0.3 μm y ángulo de la hélice de 30°. El material utilizado fue el Ti6Al4V y su composición química se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de la aleación Ti6Al4V.

Composición química del Ti6Al4V en %						
O	N	C	H	AL	Fe	V
0,18	0,015	0,04	0,006	6	0,13	4

En la Tabla 2 se muestran las propiedades termo-mecánicas del Ti6Al4V y las de la herramienta utilizada.

Tabla 2. Propiedades termo-mecánicas del Ti6Al4V y de WC/Co.

Propiedades termo-mecánicas	Ti6Al4V	WC/Co	Unidades
Expansión Térmica	$3 \cdot 10^{-9} T + 7 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}
Conductividad Térmica	$7,039 e^{0,0011T}$	55	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Capacidad calorífica	$2,24 e^{0,0007T}$	$0,0005T + 2,07$	$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Densidad	4,43	-	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Coeficiente de Poisson	0,34	0,22	-
Módulo de Young	$0,7412T + 113,375$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	MPa
Emisividad	0,7	0,69	-

Para la simulación por elementos finitos de la fuerza de corte se utilizó el software DEFORM-3D, siendo necesario tener en cuenta algunas consideraciones. En (1) se muestra la ecuación que describe el modelo constitutivo del material obtenida experimentalmente por Johnson-Cook. Este es un modelo de comportamiento de materiales sujeto a grandes deformaciones, altas temperaturas y altas velocidades.

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

$$D = 1 - (T / T_M)^d \quad (2)$$

$$p = (T / T_M)^b \quad (3)$$

Donde las constantes empíricas que determinan el comportamiento del material son A , B , n , C y M , el valor de A (MPa) representa el límite elástico a temperatura ambiente (20 °C), B (MPa) es el módulo de endurecimiento, C es el coeficiente relativo a la sensibilidad a la deformación plástica, n el coeficiente de acritud o sensibilidad a la deformación plástica, mientras que M es el coeficiente de ablandamiento térmico. El primer grupo de la ecuación corresponde al término elástico-plástico. El segundo a la componente de viscosidad debido a la velocidad de deformación y el tercero al efecto γ y a la temperatura, ε representa la deformación plástica, $\dot{\varepsilon}_0$ es la velocidad de deformación plástica normalizada con una velocidad de deformación de referencia, mientras que T_0 es la temperatura ambiente y T_M es la temperatura de función del material. En el trabajos de (Özel et al., 2011), se ha introducido un nuevo término al modelo original de Johnson-Cook, el último término apreciable en (1) incrementa la sensibilidad del modelo al ablandamiento térmico, donde $s=0.05$, $r=2$, $d=1$, $b=5$, y la temperatura de fusión es $T_M = 1450$ °C. Considerando que los coeficientes más recientes fueron obtenidos por instrumentación más moderna, además de ser el más citado en la literatura analizada se decide utilizar estos valores para la simulación. Por otra parte, el mallado es uno de los pasos más importantes en el modelado de cualquier

proceso, ya que de no estar bien definido puede ocasionar problemas de convergencia además de demoras excesivas en el transcurso de la simulación. Este parámetro definirá el tamaño de los elementos, seleccionándose para la pieza el valor de 0.1 mm para la zona distante del borde cortante y en la región del corte, que necesita una malla más densa, se utilizó 5 μ m. Para lograr una buena exactitud y aumentar la velocidad de mallado se establecieron dos mallas dinámicas en la zona de contacto entre la pieza y la herramienta, esto se logra vinculando la velocidad de la malla a la velocidad de uno de los elementos. El coeficiente de fricción es otro aspecto importante a tener en cuenta, sin embargo, la selección de dicho valor no puede realizarse únicamente desde consideraciones teóricas, sino que debe basarse en la concordancia con resultados empíricos según se plantea en (Oliaei & Karpát, 2017). En este trabajo se utilizó el coeficiente de fricción de Coulomb 0.6, teniendo en cuenta los resultados de la investigación realizada por (La Fé, Cannavacciolo, Rivas, & Quiza, 2017).

Para validar los resultados de la simulación fueron realizados experimentos en una máquina herramienta por control numérico modelo Kern. Para la medición de las fuerzas se utilizó una plataforma dinamométrica Kistler Minidyn 9256, con sensores piezoeléctricos, los que permite captar la fuerza ejercida por la fresa en los tres planos con una sensibilidad en los ejes z, x de 26 pc/N y 13 pc/N en el eje y. La instalación experimental se muestra en la Figura 1.

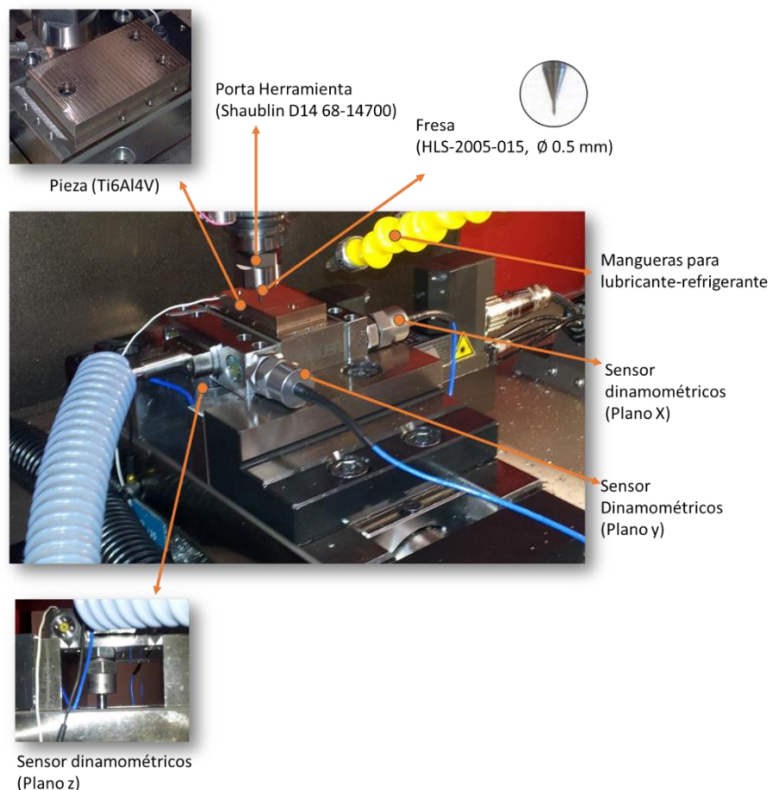


Figura 1. Instalación experimental.

En la Figura 2, mostramos el comportamiento típico de las mediciones de fuerzas obtenidas, podemos apreciar en la región marcada de color rojo el rango donde la herramienta no está cortando (Zona de no corte), este tiempo es debido al posicionamiento de la herramienta, por lo que esta señal no nos brinda ninguna información importante para el estudio del fenómeno. La región que se muestra marcada en azul es cuando comienza el corte o concluye (Zona de transición), de procesar estas mediciones estaríamos incluyendo variables ruidosas a nuestro análisis, ya que no representan las fuerzas reales involucradas en el proceso. Podemos apreciar enmarcado en color rojo un incremento brusco de fuerza, estos

incrementos pueden estar ocasionados por virutas trabadas en el proceso de corte, por lo que pueden estar consideradas como datos atípicos. La región subrayada en color verde (Zona de corte estable) es la que posee las mediciones estables de Fuerza del experimento. Esta región es la que se debe analizar para poder trabajar con datos estables y homogéneos.

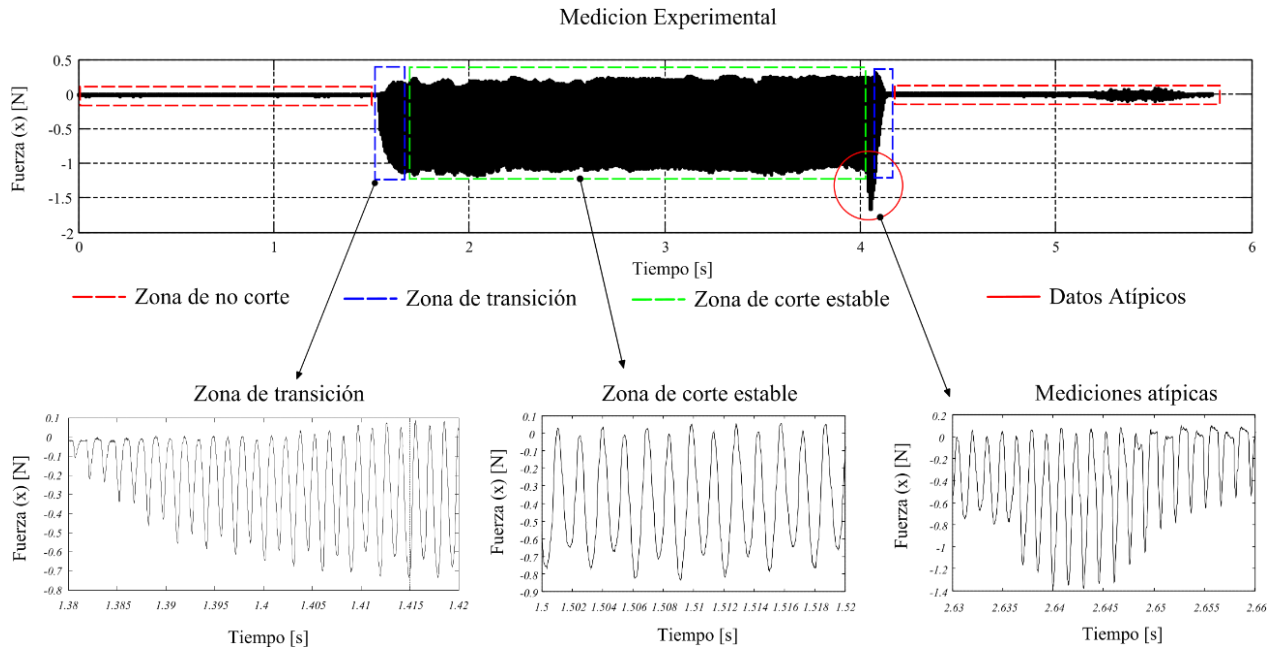


Figura 2. Zonas obtenidas en los registros experimentales.

Al aplicarle la transformada de óndula (*wavelet transform*) a la señal de fuerza correspondiente, el resultado es una descomposición de la señal en una componente de alta y una de baja frecuencia, la componente de alta, es la misma señal suavizada para el nivel y la familia de *wavelet* correspondiente. La componente de baja frecuencia muestra una línea recta con algunos saltos, éstos corresponden a cambios transitorios de la señal en el tiempo, los saltos más grandes equivalen a los mayores cambios. En la Figura 2 se muestra la señal de fuerza original y la componente de baja frecuencia, en esta última se aprecian unos puntos encima de cada uno de los mayores saltos, en nuestra señal esto significa que en esos puntos se encuentra las zonas de transición mencionada anteriormente. Si seleccionamos directamente ese intervalo, estaríamos incluyendo en el análisis la zona de transición además de la estable, para retirar la zona de transición es necesario establecer un coeficiente, que será el porciento de todo el rango que se encuentra en esa dicha zona, para estos casos basta con retirar 10 por ciento de los extremos de la señal, dicho por ciento se pudo mantener constante en todos los análisis ya que en todos los casos basta para descartar la zona de transición del análisis de modelo.

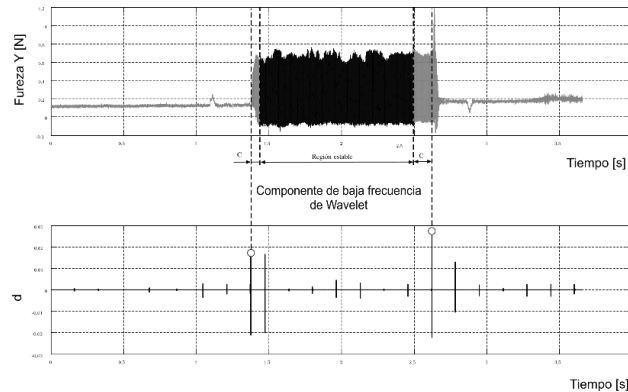


Figura 3. Selección del intervalo de corte estable de la herramienta utilizando la transformada ondulatoria.

Para medir la fuerza de corte resultante (F_r) que se obtienen en el proceso de micro fresado al variar el avance (f_z), la profundidad de corte (a_p) y la velocidad de corte (V) se realizó un diseño de experimento ortogonal L9, cada factor se varió en tres niveles como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Factores y niveles seleccionados para la experimentación.

Factores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Velocidad de corte, v (m/min)	32	52	72
Avance, f_z ($\mu\text{m}/\text{d}$)	5	10	20
Profundidad de corte, a_p (μm)	13	27	34

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados experimentales y simulados, así como el error relativo calculado en (5) se muestran en la Tabla 4. En (4) se muestra la ecuación obtenida para los regímenes utilizados en los experimentos, el resultado de la regresión se puede apreciar en la Tabla 5, así como el análisis de ANOVA en la Tabla 6.

Tabla 4. Resultados experimentales.

V [m/min]	f_z [$\mu\text{m}/\text{d}$]	a_p [μm]	F_R^{exp} [N]	F_R^{sim} [N]	Error (%)
32	5	13	0,996	0,924	7,2
32	10	27	2,522	1,976	21,6
32	20	34	3,774	2,952	21,8
52	5	27	1,578	1,538	2,5
52	10	34	2,254	2,251	0,1
52	20	13	1,705	1,306	23,4
72	5	34	1,631	1,925	18,0
72	10	13	0,919	0,925	0,6
72	20	27	1,885	1,719	8,8

$$F_R = \frac{0,4716a_p^{0,75}f_z^{0,37}}{v^{0,48}} \quad (4)$$

Tabla 5. Análisis de regresión.

Parámetros	Estimado	Error Estándar	T Estadística	Valor de probabilidad
CONSTANTE	-0,325	0,235	-1,386	0,224
a_p	0,748	0,091	8,243	0,000
f_z	0,374	0,066	5,689	0,002
v	0,483	0,112	-4,329	0,008

Tabla 6. Análisis de ANOVA.

	Suma de Cuadrados	Df	Media de Cuadrados	F-Fisher	Valor de Probabilidad
Modelo	0,2790600	3	0,0930688	39,68	0,0000
Residuales	0,0117262	5	0,00234524		
Total	0,291	8			

$$error = \frac{F_R^{exp} - F_R^{sim}}{F_R^{exp}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Como se puede observar en la Tabla 4, los valores del error relativo se encuentran entre 0,13 y 23,4%.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se pueden derivar las siguientes conclusiones:

1. Los valores de errores relativos alcanzados muestran excelentes resultados para las simulaciones realizadas de la aleación Ti6Al4V en los rangos de régimen de corte experimentados.
2. La simulación por elementos finitos es un método que permite obtener los valores de fuerza de corte para el micro fresado con un buen nivel de confiabilidad para fines prácticos.
3. El valor máximo del error relativo es de un 23,4 %, siendo valores comparados a los de la literatura, correspondiéndose con el régimen mayor avance por diente.
4. El mínimo error relativo (0,13 %) se corresponde con el régimen de menor avance.
5. Los valores de errores relativos por debajo de 7,2% se obtienen con los valores de avance entre 5-10 $\mu\text{m/d}$.

5. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener constancia de ningún conflicto de intereses relacionado con el trabajo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gowtham, G., Dharanidhar, E., Pavan, C. H., Ashwin, S., & Prasad, D. C. (2014). 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.
- Johnson, G. J., & Cook, W. H. (1983). *A constitutive model and data for metals subjected to large strains high strain rates and high temperatures*. Paper presented at the Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics.
- La Fé, I., Cannavacciolo, C., Rivas, M., & Quiza, R. (2017). Influencia de los modelos de fricción en la simulación por elementos finitos del microfresado de Ti6AlV. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 21(2), 21-30.
- Oliaei, S. N. B., & Karpát, Y. (2017). 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.
- Özel, T., Thepsonthi, T., Ulutan, D., & Kaftanoglu, B. (2011). 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.
- Pittalà, G. M., & Monno, M. (2010). 3D Finite Element modeling of face milling of continuous chip material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5), 543-555.
- Thepsonthi, T., & Özel, T. (2013). 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.
- Thepsonthi, T., & Özel, T. (2015). 3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Experimental validations on chip flow and tool wear. *Journal of Material Processing Technology*, 221, 128-145.
- Uriarte, L., Bueno, R., Gonzalo, O., Lopez de la Calle, L. N., & Lamikiz, A. (2006). Mechanistic modelling of the micromilling operation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(1), 23-33.
- Wu, H. B., & Zhang, S. J. (2014). 3D FEM simulation of milling process for titanium alloy Ti6Al4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 8(5), 1319-1326.

SOBRE LOS AUTORES

Marcelino Rivas Santana. Ingeniero Mecánico, Profesor Titular de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Matanzas, Doctor en Ciencias Técnicas, miembro del Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS). Email: marcelino.rivas@umcc.cu

Cecilio Cannavacciolo Díaz. Ingeniero Mecánico, Master en Ciencias de la Universidad Autónoma de Nueva León (UNAL). México. Email: Cecilio.Cann@yahoo.com

Iván La Fé Perdomo. Ingeniero Mecánico y Master en Ciencias. Miembro del Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas. Email: ivan.lafe@umcc.cu