

Análisis del Efecto Tamaño en el Microfresado

P. Rodríguez Mateos, J. Labarga Ordóñez

Dpto. de Ingenierías Mecánica, Informática y Aeroespacial. Universidad de León
pablo.rodriguez@unileon.es

En el presente trabajo se pretende iniciar el desarrollo de un modelo analítico de fuerzas en operaciones de microfresado considerando los factores más relevantes que influyen en el proceso. Se considera que el efecto tamaño es un factor importante, ya que en este tipo de operaciones el espesor de viruta es comparable al radio de redondeo del filo debido a limitaciones en el proceso de fabricación de la herramienta. Este efecto modifica los ángulos de entrada y salida de los filos en la pieza y a su vez modifica las fuerzas en comparación con los valores que tienen lugar en el proceso convencional. La dependencia de los ángulos de entrada y salida respecto a las fuerzas obliga a calcular estos valores mediante un proceso iterativo que se resuelve mediante un programa informático. El efecto tamaño se ha analizado para dos tipos de microfresado: en contraposición y en concordancia. Los resultados experimentales muestran un buen ajuste con el modelo. El modelo propuesto en este trabajo es de aplicación a la monitorización del proceso, así como a su control adaptativo.

1. INTRODUCCIÓN

En los actuales dispositivos electrónicos, sensores y sistemas electromecánicos la miniaturización es cada vez más exigente [1,2]. Muchas de las piezas requeridas para estos sistemas son metálicas, por lo que el microfresado es uno de los métodos más adecuados para obtenerlas [3].

Dado que las fuerzas del proceso son comparativamente mayores en microfresado que en fresado convencional [4], es muy conveniente la monitorización del proceso mediante control adaptativo en tiempo real mediante un modelo de fuerzas para evitar la rotura de la herramienta.

Este estudio se propone caracterizar las fuerzas de corte en las operaciones de microfresado, en el cual hay muchos más factores de influencia que en las operaciones de fresado convencional, ya que cualquier desviación de la herramienta puede causar variaciones significativas de la fuerza, debido a que ésta depende en gran medida del espesor de viruta.

Los modelos mecanísticos han demostrado ser de mucha utilidad en la caracterización del proceso, aunque se han propuesto modelos más generales que incluyen una consideración de la geometría del proceso y las características del material [5,6]. Sin embargo, existe una cierta falta de información en cuanto a las características mecánicas de los materiales de la herramienta y la pieza. Dado que las estimaciones de la fuerza son muy sensibles a variaciones en estos datos, los modelos mecanísticos presentan una gran ventaja para solucionar este problema [7].

Así, en el presente artículo se desarrolla un modelo de precisión para el análisis del efecto tamaño en fresado con herramientas de dos dientes, ya que es el caso más habitual en microfresado y fácilmente puede ser generalizado para un número mayor de filos. Las ecuaciones resultantes se resuelven directamente, ya que responden a un sistema de comportamiento lineal y no es necesario, por tanto, un procedimiento iterativo. El efecto tamaño provocará que haya zonas en las que sólo corta uno de los filos, generando así fuerzas que se determinan mediante expresiones diferentes de las que se usan para el corte convencional.

El efecto tamaño provoca además que cuando la herramienta entra en contacto con la pieza tenga lugar un periodo de recalcado antes de que el filo comience a cortar cuando el espesor de la viruta sea suficientemente grande en comparación con el radio de redondeo del filo. Esto hace que los ángulos de entrada o salida del filo en la herramienta sean diferentes de

los que tienen lugar en fresado convencional. El modelo incluye, por tanto, un algoritmo para el cálculo de los ángulos de entrada y salida de los distintos filos de la herramienta.

Para analizar correctamente el efecto tamaño será necesario plantear un modelo en el que se tenga en cuenta la geometría de la herramienta, así como la trayectoria del filo, para determinar el espesor de viruta que corresponde a cada posición angular de la herramienta.

2. DESARROLLO DEL MODELO ANALÍTICO

2.1. Características geométricas

Las fuerzas en un punto genérico definido por su ángulo de posición φ tendrán una componente tangencial y otra radial. La posición del extremo superior del filo se sitúa en el ángulo α . En condiciones ideales, es decir, sin efecto tamaño, el espesor de viruta para la operación de fresado en contraposición se puede aproximar [8] por la siguiente expresión:

$$t_c = f_z \cdot \sin \varphi \tag{1}$$

Donde f_z es el avance por diente de la operación y φ es el ángulo de posición del punto considerado. Asimismo, para la modalidad de fresado en concordancia, el espesor de viruta viene dado por la expresión:

$$t_c = f_z \cdot \cos \varphi \tag{2}$$

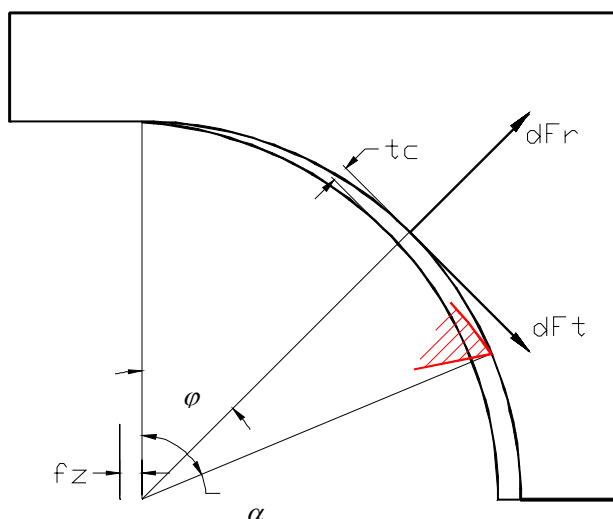


Figura 1. Geometría del fresado en contraposición

Partiendo del espesor de viruta, según se indica en la figura 1, se puede obtener la fuerza que experimenta la herramienta en cada elemento diferencial de altura mediante las fórmulas proporcionadas por [9] que considera el efecto del corte y del recalado conjuntamente:

$$dF_t = (K_{te} + K_{tc} \cdot t_c) \cdot dz \tag{3}$$

$$dF_r = (K_{re} + K_{rc} \cdot t_c) \cdot dz \tag{4}$$

2.2. Efecto tamaño

Como se conoce, cuando el espesor de viruta es muy pequeño comparado con el radio de redondeo del filo, el filo de corte no puede ser considerado como una línea, sino como una superficie redondeada. Este factor provocará que exista un componente importante de recalado en la fuerza del proceso. Por otro lado, el redondeo del filo hará que en algunos casos no exista formación de viruta, sino sólo fenómeno de recalado [10].

En consecuencia, los filos no empiezan a cortar hasta que el espesor de viruta alcanza un cierto valor. Este valor puede calcularse multiplicando el radio del filo r_e por una constante de proporcionalidad experimental λ_c , como se indica a continuación:

$$t_{c\min} = \lambda_c \cdot r_e \quad (5)$$

Por tanto, con el valor crítico se pueden calcular los ángulos de entrada y salida del corte. De esta manera se pueden obtener las regiones de corte y las regiones de recalado en cada instante del proceso para determinar la fuerza resultante de todos los elementos diferenciales de altura del filo.

Si se toma en consideración la desviación excéntrica de la herramienta se deduce que hay zonas en las que solo corta uno de los filos, ya que el otro tiene un alcance menor. En esas zonas la trayectoria de la herramienta es la correspondiente a un proceso ideal, es decir, sin desviación excéntrica, con un valor doble de avance por diente. En esas zonas el corte se denomina asimétrico, ya que está desequilibrado respecto al otro diente, mientras que en las zonas en las que actúan los dos filos el corte se denomina simétrico.

Si se aplica la ecuación (5) al corte asimétrico se obtiene el ángulo de entrada de la herramienta en esta zona: Integrando estas ecuaciones y expresándolas en forma matricial, se obtiene:

$$\alpha_{ac} = \arcsin \frac{\lambda_c \cdot r_e}{2 \cdot f_z} \quad (6)$$

2.3. Formulación general del modelo

A continuación se establecerán las expresiones matemáticas de las fuerzas que tienen lugar en el proceso considerando el efecto tamaño. Con el espesor de viruta dado por las expresiones (1) y (2) se pueden obtener las fuerzas del proceso. Dado que se ha considerado también el fenómeno de la desviación excéntrica de herramienta habrá un valor distinto de la fuerza en cada filo. Por otro lado, como se ha tenido en cuenta la deflexión de herramienta, la obtención de los valores de las fuerzas requerirá de las mismas fuerzas. Las expresiones en función del ángulo de posición φ se pueden resumir de la siguiente manera: continuación:

$$\begin{aligned} dF_j(i) &= f[\varphi, F_x(1), F_y(1), F_x(2), F_y(2)] \cdot d\varphi \\ i &= 1, 2 \\ j &= x, y \end{aligned} \quad (7)$$

Integrando estas ecuaciones y expresándolas en forma matricial, se obtiene:

$$\vec{F} = A \cdot \vec{F} + \vec{b} \quad (8)$$

Donde \mathbf{F} es el vector de fuerzas, que incluye las dos componentes de la fuerza en ambos dientes. Como se puede ver constituye un sistema lineal de ecuaciones. Esta formulación matemática es debida a la manera en que se ha modelado la deflexión de herramienta, en la que la desviación es proporcional a las mismas fuerzas. Este sistema puede ser resuelto de manera directa.

3. RESOLUCIÓN DEL MODELO

Mediante el modelo propuesto se pueden obtener las fuerzas de corte, así como las fuerzas de recalado, es decir, las que se ejercen cuando la herramienta no está cortando, sino sólo comprimiendo el material de la pieza por no haber suficiente espesor de viruta como para que se produzca el corte. Esta situación se dará cuando el filo esté en contacto con la pieza pero sin haberse iniciado el corte. Las zonas donde ocurra esta situación se deberán determinar geoméricamente. Para ello se analizará el caso del fresado en contraposición, cuyos ángulos de entrada se esquematizan en la figura 2, en la que se observan los ángulos que delimitan las distintas zonas de corte de la herramienta en fresado en contraposición.

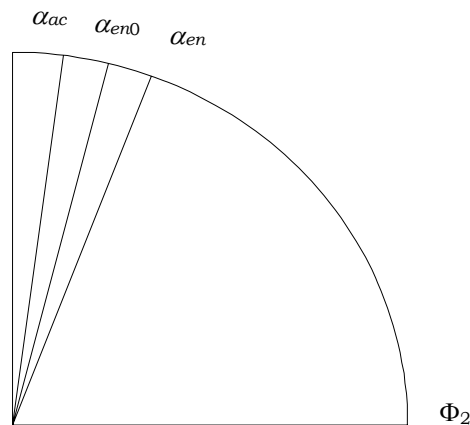


Figura 2. Ángulos de las distintas zonas de corte en el fresado en contraposición

A medida que los dientes vayan pasando por esas zonas comenzarán a darse los distintos tipos de fuerzas de corte o recalado en uno de los dientes o en los dos. Habrá que tener en cuenta, por tanto, el paso de la punta del diente por cada uno de esos ángulos, pero también el del extremo superior del diente, ya que determinará la salida del diente de las distintas zonas.

En el origen de ángulos el diente 1 entra en contacto con la pieza, aunque no empiece el corte debido al efecto tamaño. En este punto comenzará el recalado del diente 1. Cuando el diente alcanza el ángulo α_{ac} dará comienzo el corte asimétrico en el diente 1, que continuará hasta que el diente 2 haya comenzado a cortar en el ángulo α_{en} . El ángulo α_{en0} representa el inicio del contacto del diente 2 con la pieza, por tanto, darán comienzo las fuerzas de recalado en ese diente. A partir del ángulo α_{en} el corte será de tipo simétrico, que coexistirá con los otros tipos de fuerzas descritos hasta que el extremo superior del diente haya rebasado el ángulo α_{en} . El diente 1 abandona la pieza en el ángulo Φ_2 .

Para determinar las fuerzas en cada zona se deberán computar los distintos tipos de fuerzas en cada diente en la zona del filo que caiga dentro de ella. En la tabla 1 se indican los tipos de fuerzas que actúan en cada zona y los límites de la porción de filo implicada en cada tipo de corte.

En general la fuerza en el proceso se puede expresar como suma de todos los tipos de fuerzas en los dos dientes: se obtiene:

$$\vec{F} = \vec{F}_r + \vec{F}_{ac} + \vec{F}_{sc} \quad (9)$$

De esta expresión habrá que eliminar los términos que no aparezcan según la zona en la que se encuentre la herramienta.

Intervalo	DIENTE 1						DIENTE 2			
	F_r		F_{ac}		F_{sc}		F_r		F_{sc}	
	L_{inf}	L_{sup}	L_{inf}	L_{sup}	L_{inf}	L_{sup}	L_{inf}	L_{sup}	L_{inf}	L_{sup}
$[0, \alpha_{ac}]$	0	α	-	-	-	-	-	-	-	-
$[\alpha_{ac}, \alpha_{en0}]$	0	α_{ac}	α_{ac}	α	-	-	-	-	-	-
$[\alpha_{en0}, \alpha_{en}]$	0	α_{ac}	α_{ac}	α	-	-	α_{en0}	α	-	-
$[\alpha_{en}, \delta]$	0	α_{ac}	α_{ac}	α_{en}	α_{en}	α	α_{en0}	α_{en}	α_{en}	α
$[\delta, \delta + \alpha_{ac}]$	$\alpha - \delta$	α_{ac}	α_{ac}	α_{en}	α_{en}	α	α_{en0}	α_{en}	α_{en}	α
$[\delta + \alpha_{ac}, \delta + \alpha_{en0}]$	-	-	$\alpha - \delta$	α_{en}	α_{en}	α	α_{en0}	α_{en}	α_{en}	α
$[\delta + \alpha_{en0}, \delta + \alpha_{en}]$	-	-	$\alpha - \delta$	α_{en}	α_{en}	α	$\alpha - \delta$	α_{en}	α_{en}	α
$[\delta + \alpha_{en}, \Phi_2]$	-	-	-	-	$\alpha - \delta$	α	-	-	$\alpha - \delta$	α
$[\Phi_2, \delta + \Phi_2]$	-	-	-	-	$\alpha - \delta$	Φ_2	-	-	$\alpha - \delta$	Φ_2

Tabla 1. Límites de las distintas zonas del fresado en contraposición

El procedimiento para la obtención de las fuerzas de corte consiste en un cálculo punto a punto del sistema de fuerzas, que dependiendo de la posición de los dientes se computa un tipo de fuerzas u otro. Cuando el ángulo de entrada dependa de los valores de las fuerzas se procederá a un cálculo iterativo, en el que se calcularán las fuerzas suponiendo un ángulo hipotético y con ellas se determinará el espesor de viruta correspondiente. Se variará el ángulo de entrada hasta que el espesor de viruta resultante sea igual al valor crítico, según se indica en la figura 3. En caso de que se esté calculando el ángulo de comienzo del recalado se repetirá el proceso hasta que el espesor de viruta resultante sea 0, en lugar del valor crítico.

En una vuelta completa de la herramienta se pueden distinguir las siguientes zonas, según se deduce de la tabla 1:

1. $[0, \alpha_{ac}]$: Recalado del diente 1

Cálculo de las fuerzas de recalado en el diente 1

2. $[\alpha_{ac}, \alpha_{en0}]$: Corte asimétrico

El valor de α_{ac} no depende de las fuerzas, por lo que no requiere procedimiento iterativo. Se determinará, por tanto, la suma de las fuerzas de recalado más las fuerzas de corte asimétrico

3. $[\alpha_{en0}, \alpha_{en}]$: Recalado del diente 2

Suma de las fuerzas anteriores más la fuerza de recalado en el diente 2. Para el cálculo de α_{en0} se requerirá procedimiento iterativo.

4. $[\alpha_{en}, \alpha_{en} + \delta]$: Entrada del diente 2 en el corte simétrico

Se deberá actualizar a cada paso el valor α_{en} y el valor α_{en0} y calcular la suma de fuerzas de corte (recalado diente 1, corte asimétrico, recalado diente 2, corte simétrico) con los ángulos anteriormente calculados

5. $[\alpha_{en} + \delta, \Phi_2]$: Corte simétrico

Cálculo de las fuerzas simétricas

6. $[\Phi_2, \delta + \Phi_2]$: Salida de dientes

Cálculo de las fuerzas simétricas considerando un ángulo máximo igual a Φ_2

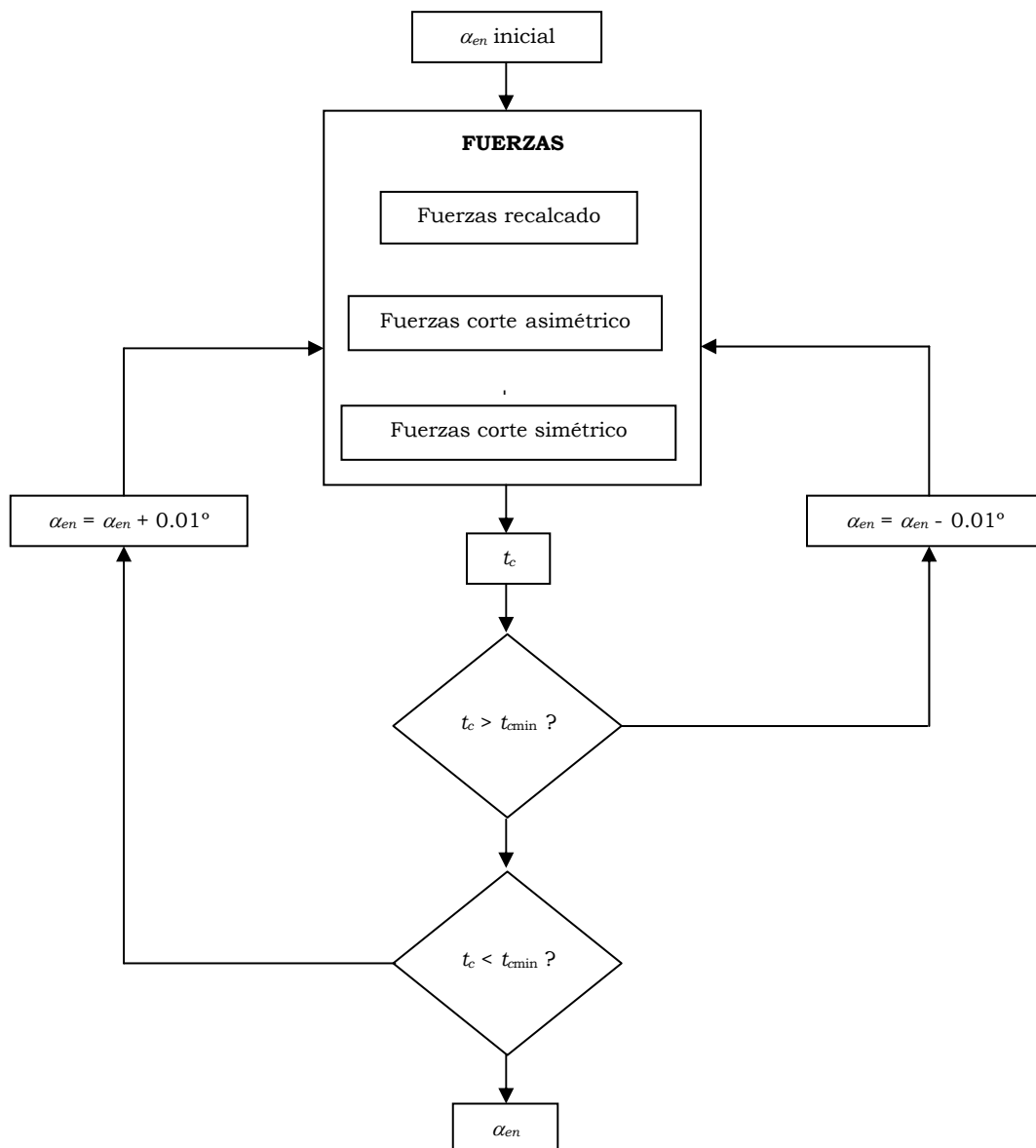


Figura 3. Algoritmo de cálculo del ángulo de entrada

4. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos de mecanizado se realizaron en una máquina KERN de Microfresado y Microtaladrado, con velocidad de giro hasta de 160.000 r.p.m. y un CNC de 0.1 μm de resolución de posicionamiento. La máquina de Microfresado se muestra en la figura 4. Se realizaron operaciones de fresado en contraposición y en concordancia en piezas de Aluminio 7075 y Acero AISI 1015. Las herramientas usadas para los ensayos fueron fresas de Carburo sin recubrimiento de 2 dientes y 0.6 mm de diámetro.

Las fuerzas de corte se midieron mediante un dinamómetro Kistler 9256C2 instalado en la mesa de la máquina, al cual estaba sujeta la pieza de trabajo. Este dispositivo mide fuerzas en los 3 ejes con una frecuencia de muestreo de hasta 100 kHz.

En las figuras 5 y 6 se presentan los resultados de la predicción de fuerzas mediante el modelo en los ejes x e y en contraste con las fuerzas experimentales medidas en el proceso.



Figura 4. Máquina de Microfresado

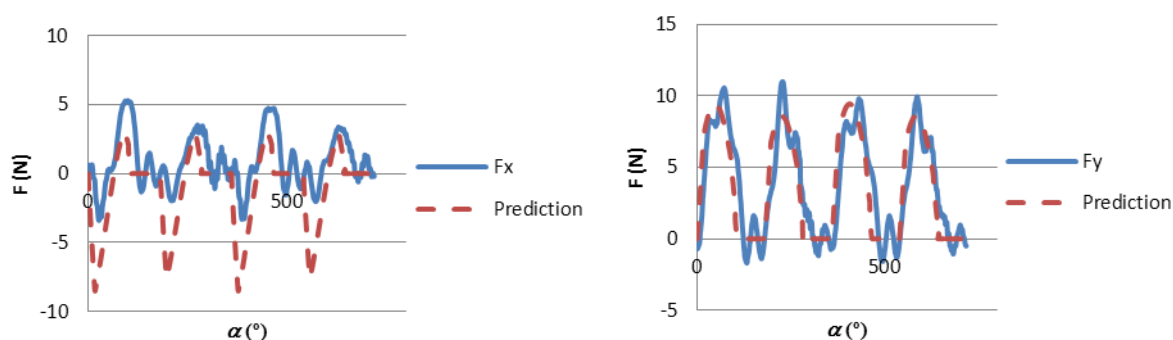


Figura 5. Resultados de la predicción de fuerzas y mediciones experimentales con los siguientes parámetros: $D = 0.6 \text{ mm}$, $f_z = 0.004 \text{ mm}$, $n = 21221 \text{ r.p.m.}$ Material Acero AISI 1015. Fresado en concordancia

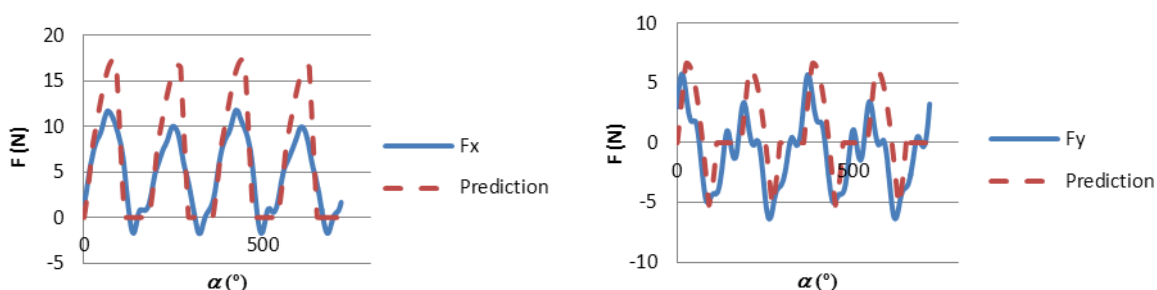


Figura 6. Resultados de la predicción de fuerzas y mediciones experimentales con los siguientes parámetros: $D = 0.6 \text{ mm}$, $f_z = 0.004 \text{ mm}$, $n = 26526 \text{ r.p.m.}$ Material Aluminio 7075. Fresado en contraposición

A pesar de las vibraciones que tienen lugar en el proceso, se puede observar que hay un buen ajuste entre los valores experimentales y las predicciones. Las vibraciones se evitaron en cierta medida mediante la aplicación de un filtro paso bajo a las medidas de las fuerzas. No obstante, debido a que la frecuencia de corte del filtro debe estar por encima de la frecuencia de paso de los dientes para no distorsionar la señal del proceso, algunas vibraciones no se pueden eliminar, ya que aparecen a frecuencias inferiores.

En ambos casos la comparación cualitativa es satisfactoria, ya que la forma de las gráficas es reproducida fielmente por las predicciones, reflejándose en ellas el desequilibrio debido a la desviación excéntrica de la herramienta. En el caso del fresado en acero, el modelo predice los valores de las fuerzas con alto grado de precisión. Las predicciones de la fuerza en y muestran un ajuste con alto grado de exactitud, mientras que las de la fuerza en x

están sobredimensionados en comparación con las medidas. Esto es debido a la distinta sensibilidad a las vibraciones que la pieza presenta en las direcciones x e y .

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo analítico de fuerzas para operaciones de microfresado, basado en la geometría del proceso y considerando los factores principales de influencia, entre ellos el efecto tamaño, la deflexión de herramienta y los ángulos de entrada y salida de la herramienta. Estos factores se han tenido en cuenta para el cálculo del espesor de viruta, que ha dado lugar a un sistema de ecuaciones lineales que se puede resolver de manera directa para cada ángulo de posición de la herramienta, haciendo que la predicción de fuerzas requiera poco coste computacional. Los parámetros del modelo han sido medidos para obtener las predicciones de las fuerzas. El contraste de las predicciones con los resultados experimentales muestra un alto grado de similitud cualitativa y en algunos casos cuantitativa. Estos resultados son muy prometedores de cara a la aplicación del modelo en sistemas de monitorización y control adaptativo del proceso.

6. REFERENCIAS

- [1] H. Pérez, A. Vizán, J.C. Hernandez, M. Guzmán, Estimation of cutting forces in micromilling through the determination of specific cutting pressures, *J. Mater. Process. Technol.* 190 (2007) 18-22.
- [2] K. Nakamoto, T. Ishida, N. Kitamura, Y. Takeuchi, Fabrication of microinducer by 5-axis control ultraprecision micromilling, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* In Press, Corrected Proof (2011) 407-410.
- [3] E. Brousseau, S. Dimov, D. Pham, Some recent advances in multi-material micro-and nano-manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 47 (2010) 161-180.
- [4] G. Newby, S. Venkatachalam, S.Y. Liang, Empirical analysis of cutting force constants in micro-end-milling operations, *J. Mater. Process. Technol.* 192-193 (2007) 41-47.
- [5] E. Budak, Y. Altintas, E.J.A. Armarego, Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data, *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME.* 118 (1996) 216-224.
- [6] E. Armarego, A generic mechanics of cutting approach to predictive technological performance modeling of the wide spectrum of machining operations, *Mach. Sci. Technol.* 2 (1998) 191-211.
- [7] W.A. Kline, R.E. DeVor, J.R. Lindberg, The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts, *International Journal of Machine Tool Design and Research.* 22 (1982) 7-22.
- [8] G. Boothroyd, W. Knight, *Fundamental of Machining and Machine Tools* Marcel Dekker, 2nd ed., , 1989.
- [9] Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, Cambridge University Press, 2000.
- [10] T. Özel , X. Liu, A. Dhanorker, Modelling and Simulation of Micro-Milling Process, 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds. (2007).