

SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA HERRAMIENTA DURANTE EL PROCESO DE FRESADO.

Fco. Eugenio López Guerrero*, Lionel S. Méndez P, Francisco Ramírez
Departamento de Sistemas Integrados de Manufactura. División de Ingeniería Mecánica.
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León,
Pedro de Alba s/n, Apdo. Postal 9-"F", CP. 66450, San Nicolás de los Garza, N.L., México.
Teléfono: (0052-81) 8329-4020. Fax: (0052-81) 8332-0904.
Correo electrónico: elopez@uanl.mx, lionelsmendezp@hotmail.com, ramirez-cruz@tuhh.de

RESUMEN

Una de las condiciones en el proceso de maquinado es la energía térmica generada durante el proceso. Esta energía puede medirse en términos de incrementos de temperatura y depende de la profundidad de corte, la velocidad de avance, de giro de la herramienta.

Este trabajo presenta una simulación basada en experimentos de los efectos de la velocidad de avance sobre el comportamiento de la temperatura durante el proceso de fresado.

ABSTRACT

One of the conditions in the machining process is the thermal energy generated during the process. This energy can be measured in terms of temperature increments and depends on the feed, depth of cut and tool cutting speed.

This work presents a simulation based on experiments on the effects of tool feed over the temperature behavior during the milling process.

INTRODUCCIÓN

En los procesos actuales de manufactura los factores que intervienen durante el maquinado están relacionados con las características finales de la pieza [1]. Uno de estos factores es la temperatura generada en el proceso. Como complemento de los experimentos y conclusiones presentadas en artículos anteriores sobre la trayectoria de herramienta [2], [3], [4] y el espesor de viruta [5], [6], el presente trabajo se enfoca en el comportamiento de la energía térmica generada durante el fresado, proponiendo un método que relaciona la temperatura registrada en el proceso con el avance de la herramienta.

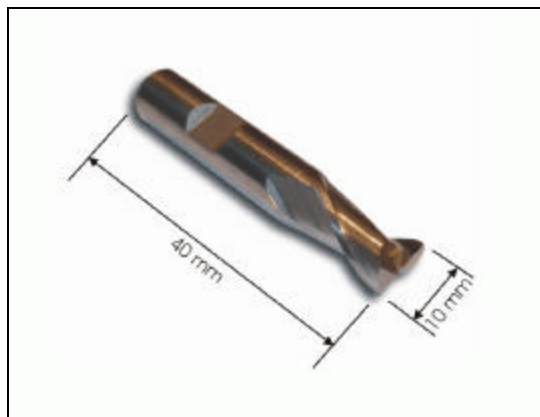


Figura 1. Herramienta utilizada en los experimentos de maquinado.

Es deseable conocer el comportamiento de la temperatura [7] en el proceso para relacionarla con las características de acabado superficial de la pieza, ya que las altas temperaturas en el proceso de maquinado ocasionan alteraciones de la superficie [8]. Además, el conocimiento de la temperatura en un proceso de maquinado permite inferir los límites de uso y vida útil de la herramienta de corte.

A lo largo del proceso de maquinado, aproximadamente el 98% de la energía utilizada que no es absorbida por el material de trabajo en forma de deformación plástica se transforma en calor [9], [10].

El conocer los niveles de energía térmica alcanzados en el proceso de maquinado permite seleccionar adecuadamente los materiales y las herramientas para los diferentes tipos de trabajos. Esta energía puede ser estimada a través de los cambios de temperatura tomando un punto de referencia determinado.



Figura 2. Medidor de emisión infrarroja acoplado en la máquina-herramienta.

En trabajos anteriores [11], [5], [6], [12] se ha presentado una metodología de análisis para evaluar las condiciones de maquinabilidad de una aleación de aluminio 6063. El método utilizado fue a través de la medición de la temperatura durante el proceso de maquinado mediante un termómetro infrarrojo [12]. Este método tiene la ventaja de poder considerar un valor de temperatura muestreado representativo del proceso de corte en forma global. Al mismo tiempo, presenta la desventaja de no considerar la temperatura en forma local en los filos de la herramienta. El presente trabajo muestra cómo se puede estimar la distribución de la temperatura en la herramienta a partir de los datos muestreados.

OBJETIVOS

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Estimar la distribución de temperatura en la herramienta
- encontrar los valores de temperatura máximos en los filos mediante una simulación de elemento finito
- validar las mediciones hechas experimentalmente.

EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

El método de elemento finito basa su operación [13] en la capacidad de dividir un continuo en un número finito de elementos, para posteriormente resolver un sistema de funciones continuas, considerando las interacciones que pudieran ocurrir entre ellos [14]. La secuencia de pasos para la solución de un problema por medio del elemento finito es:

- Discretizar la región
- Especificar las funciones de interpolación
- Desarrollar el sistema de ecuaciones
- Resolver el sistema de ecuaciones
- Calcular cantidades adicionales de interés

Los programas computacionales de elemento finito ofrecen una forma de resolver problemas complejos mediante la subdivisión de elementos más simples interrelacionados [15]. En conjunto con el módulo de cálculo, las propiedades de los elementos inuidos en los programas computacionales permiten resolver problemas acordes a ellas [16]; esa es la razón por la cual el espectro de selección de elementos en un programa de computadora de elemento finito es amplio.

El método tiene dos características:

- Utiliza elementos discretos para calcular los valores de los grados de libertad en los puntos de unión y con éstos obtener valores derivados que resulten de interés en cada miembro de un sistema discreto.
- Usa los elementos continuos para obtener soluciones aproximadas a sistemas continuos [17] como transferencia de calor y mecánica de fluidos.

METODOLOGÍA

A partir de datos obtenidos experimentalmente y los resultados de ellos es posible calcular la temperatura promedio de maquinado. Esta temperatura se utiliza como referencia para el análisis geométrico de la herramienta por medio de una simulación de elemento finito.

La temperatura de referencia se obtiene a partir de las mediciones hechas con un sensor infrarrojo durante pruebas de maquinado.

Sintonizando las condiciones iniciales de la simulación es posible encontrar las condiciones de frontera para que la temperatura promedio simulada sea igual a la temperatura de referencia. Bajo estas condiciones la simulación arrojará los valores puntuales de temperatura en la herramienta.

Las condiciones iniciales de la simulación son la temperatura de referencia, la temperatura ambiente y la conductividad térmica de la herramienta. El parámetro de sintonización es la temperatura en el punto de contacto de la herramienta al realizar el corte.

El foco de interés de este trabajo se centra en observar la distribución de la temperatura y en encontrar la temperatura en los filos de la herramienta. Cuando la temperatura de referencia sea igual a la temperatura promedio simulada el valor encontrado es suficientemente aproximado.

DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA

El material usado en los ensayos fue un perfil extruído de aluminio comercial para maquinado. El resultado del análisis electroquímico identificó al material como aluminio 6063. Los resultados de las pruebas de tensión revelan que el material es una aleación con tratamiento térmico clase T8.

Para los ensayos se maquinó la barra de aluminio con condiciones de corte fijas. No se utilizó refrigerante. Los valores de corte se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. Valores de corte utilizados.

Velocidad de giro S (rpm)	1500
Profundidad de corte t (mm)	2.54
Velocidad de avance F (mm/min)	120

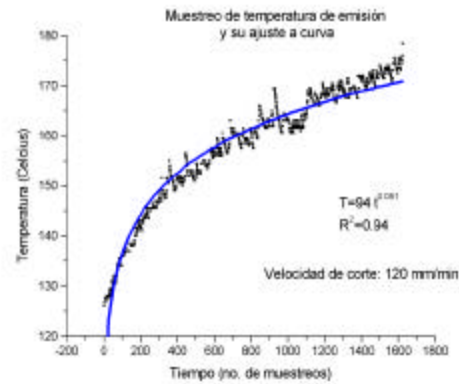


Figura 3. Datos de temperatura muestreados durante el maquinado y su ajuste a una curva exponencial.

La medición de temperatura fué hecha utilizando un sensor infrarrojo con conexión a computadora. Los datos se muestrearon cada 18 milisegundos y se procesaron ajustándolos a ecuaciones que representaran el comportamiento de la temperatura a través del proceso de maquinado.

La ecuación 1 es el resultado del ajuste a una curva exponencial de los datos de temperatura muestreados (ver figura 3):

$$T = 94 t^{0.081} \quad (1)$$

El valor de la temperatura de referencia fue calculado por medio de la ecuación 1 para el dato número 2000:

$$T_{\text{ref}} = 173.984 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

La tabla 2 presenta los datos de la herramienta utilizada en los experimentos.

TABLA 2.- Datos de la herramienta utilizada en los experimentos.

Radio	10 mm
Longitud	40 mm
No. de álabes	2
Material	Acero de alta velocidad
Conductividad térmica	19 W/m K



Figura 4. Modelo geométrico de la herramienta utilizada en los experimentos, cuya foto se muestra en la figura 1.

CONDICIONES DE SIMULACIÓN

La simulación se hizo utilizando un programa de computadora comercial. En la modelación se asignaron las condiciones de frontera mostradas en la figura 5: 20 °C para la temperatura del medio ambiente en la superficie de la sección final de la herramienta y diferentes temperaturas en la punta exterior del filo de la herramienta cuyos valores se presentan en la figura 8a.

La tabla 3 muestra los valores de los parámetros utilizados en las simulaciones.

TABLA 3.- Datos usados en el programa de análisis de elemento finito.

Programa	Ansys v5.3 w98
Módulo empleado	Thermal
Dimensión	3D
Grados de libertad	1 (temperatura)
Tipo de análisis	Estático
Tipo de elemento	Tetraedro térmico sólido de diez nodos (Tet10node).
Propiedades	Geometrías complejas o irregulares.
Número de nodos	1141
Temperatura ambiente	20 °C

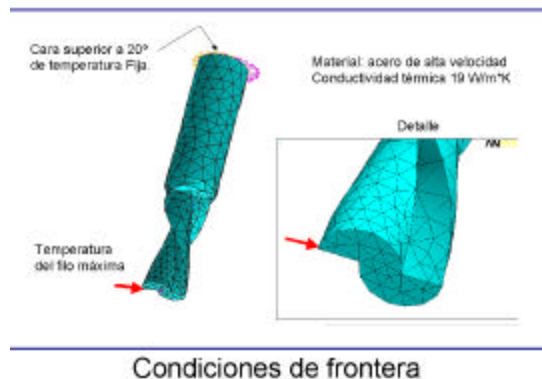


Figura 5. Geometría enmallada y establecimiento de condiciones para el análisis FEM.

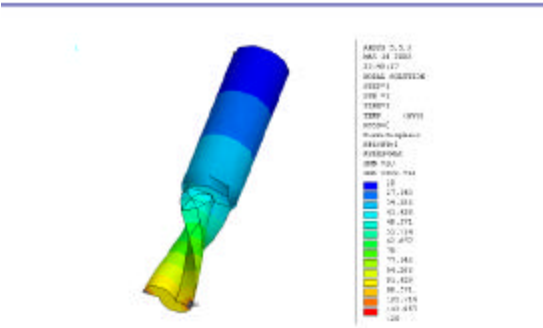
RESULTADOS

La temperatura promedio se calculó del listado de valores de temperatura de los 1141 nodos utilizados en la simulación de elemento finito. Las figuras 6 y 7 muestran la distribución de temperatura en la herramienta. Los valores de las simulaciones para diferentes temperaturas en los filos de la herramienta se grafican en la figura 8a.

Por medio de una regresión lineal se encontró la proporcionalidad de la temperatura promedio simulada con respecto a las condiciones de temperatura simulada en el filo (ecuación 3):

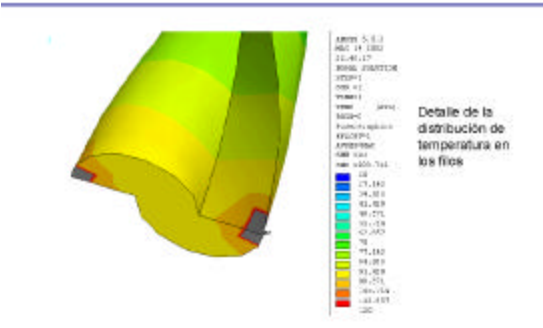
$$T_{\text{prom}} = 0.372 T_{\text{filo}} + 12.1 \quad (3)$$

Por lo que la relación existente entre la temperatura promedio y la de trabajo es de 0.372.



Distribución de temperatura

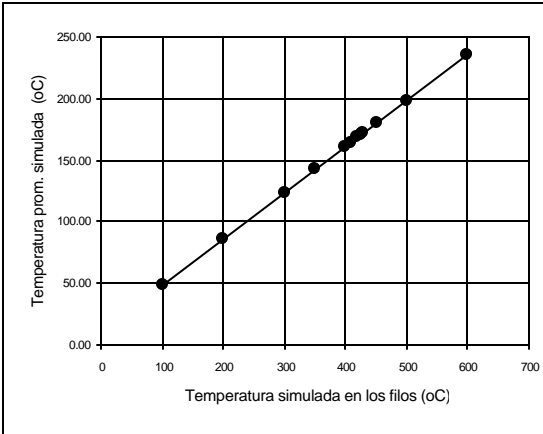
Figura 6. Distribución de temperatura a lo largo de la geometría de la herramienta.



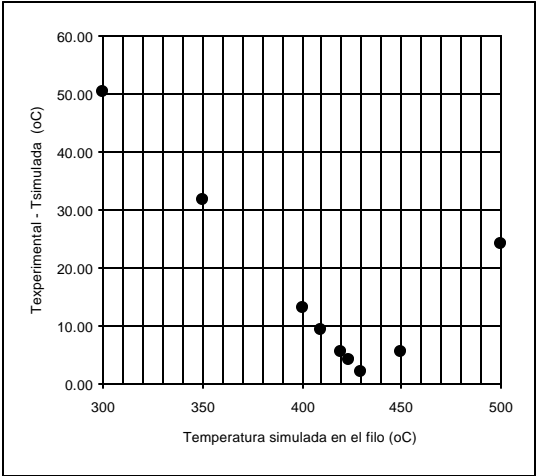
Temperatura máxima

Figura 7. Detalle de la distribución de temperatura en el filo externo de la herramienta.

En la figura 8b se observa que la temperatura máxima en los filos para una diferencia mínima entre la simulación y el muestreo es de 430 °C.



(a)



(b)

Figura 8. Gráfica que muestra (a) la temperatura promedio como función de la temperatura de los filos durante la simulación y (b) diferencia entre la temperatura promedio simulada y la muestreada como función de la temperatura simulada en el filo.

CONCLUSIONES

La distribución de temperatura de maquinado en la herramienta para las condiciones experimentales dadas puede calcularse por simulación de elemento finito.

La temperatura promedio de los nodos de simulación es proporcional a la de trabajo. Esta proporcionalidad es constante para las condiciones geométricas de herramienta con las que se hizo la simulación.

Utilizando el método aquí presentado es posible encontrar la relación para diferentes condiciones de maquinado como las presentadas en [12].

RECONOCIMIENTOS Y EQUIPO UTILIZADO

El presente trabajo fue realizado por los autores como parte de su proyecto de investigación en el Doctorado de Materiales FIME-UANL bajo el apoyo de PROMEP, PAICYT 2001 (contrato CA556-01) y CONACYT (clave 37668-U) utilizando las instalaciones del Centro de Manufactura Integrada por Computadora y del Programa Doctoral de Materiales de la FIME UANL:

- Centro de Maquinado EMCO VMC 300.
- Licencia de software Ansys v5.3 para Windows.
- Termómetro de Emisiones Infrarrojas Raytek modelo Raygner MX4
- Licencia de software Raytek Graphic.

Los autores agradecen la colaboración de la Dra. Martha Guerrero y del Dr. Juan Antonio Aguilar Garib del Programa Doctoral de Materiales de la FIME.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cook, N., "Tool Wear and Tool Life", ASME Transactions, Vol. 95, pp. 931-938, Noviembre 1973.
- [2] López, E., Ramírez, F. "Maquinado de trayectorias en dos dimensiones basadas en pixeles". Revista Ingenierías vol. IV, no. 10, 2001.
- [3] López, E., Colás, R., Rall, K., Ramírez, F. "Generación de código de maquinado en 3D para modelos basados en mallas". Revista Ingenierías vol. IV, no. 10, 2001.
- [4] López, E., Colás, R., Rall, K., Ramírez, F. "Maquinado de una sucesión de curvas". Revista Ingenierías vol. IV, no. 11, 2001.
- [5] López, E., Ruiz, M., Colás, R. "Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado. Parte I". Revista Ingenierías vol. IV, no. 13, 2001.
- [6] López, E. Ruiz, M. "Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado. Parte II. Validación experimental". Revista Ingenierías vol. V, no. 14, 2002.
- [7] Trigger, K.J., "Progress Report No.2 on Tool-Chip Interface Temperatures", ASME Transactions, Vol. 71, No. 2, pp. 163-174, Febrero 1949.
- [8] López, E. Cavazos, R. Delgado, M. "Caracterización de superficies maquinadas por medio de parámetros de rugosidad". Revista Ingenierías vol. V, no. 16, 2002.
- [9] Metals Handbook, 9th edition, Vol. 16 "Machining", ASM International, 1989.
- [10] Groover, Mikell P., "Fundamentals of Modern Manufacturing", Ed. Prentice-Hall, 1996.
- [11] Zambrano, P., Escamilla, I., López, E., "Improvement of aluminium parts machining process in a numerical control milling machine". International Materials research Congress 2001. Academia Mexicana de Ciencia de Materiales, A.C., 2001.
- [12] López, E. Ruiz, M. Méndez, L. "Evaluación de las condiciones de maquinado por medio de emisiones infrarrojas". Revista Ingenierías vol. V, no. 16, 2002.
- [13] O. Zienkiewicz, R. Taylor. "The finite element method". Ed. Mc Graw Hill, 1967.
- [14] S. Moaveni. "Finite element analysis". Ed. Prentice Hall, 1999.
- [15] M. Gupta., N. Srikanth, L. ThamO. Zienkiewicz, R. Taylor. "The modeling

and determination of elastic modulus of aluminium matrix composites using the free-free beam technique". Aluminium transactions, vol.2 no.1, 2000.

- [16] Ramírez-Cruz, F. "Validating of optimization models for the Bio-Cast-Design". Master Thesis, Technische Universität Hambrug-Harburg, 2001.
- [17] R. Bui. "Modeling for the optimization of processes in the aluminium industry". Aluminium transactions, vol.2 no.1, 2000.

López Guerrero, Francisco Eugenio, M.C.

Ingeniero Mecánico Electricista e Ingeniero en Control y Computación de la UANL. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Administración con especialidad en Sistemas en la misma Universidad, durante estos estudios participó en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania en donde desarrolló su tesis de maestría. Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la FIME. Actualmente desarrolla su tesis doctoral en Máquinas-Herramienta en el programa doctoral de Materiales de la FIME trabajando en conjunto con el Departamento de Materiales y Automatización de la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania.

Méndez Portillo, Lionel Sergio

Estudiante de noveno semestre de la carrera Ingeniero Mecánico Electricista. Miembro del grupo Talentos de estudiantes de la UANL. Actualmente colabora en la División de Ingeniería Mecánica de la de la FIME.

Francisco Ramírez Cruz, Ing

Ingeniero Mecánico Electricista, Maestro en Ciencias de la Mecatrónica en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Profesor de la División de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Actualmente trabaja en su proyecto doctoral.