

PREDICCIÓN DEL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE CORTE POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

MSc. Julio Ernesto de la Rosa Melian¹

Dr.C. Roberto Pérez Rodríguez²

Dr.C. Carlos Alberto Trinchet Varela³

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Julio Ernesto de la Rosa Melian, Roberto Pérez Rodríguez y Carlos Alberto Trinchet Varela (2020): "Predicción del desgaste de la herramienta de corte por el método de los elementos finitos", Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación RILCO DS, n. 10 (agosto 2020). En línea:
<https://www.eumed.net/rev/rilcoDS/10/desgaste-herramienta.html>

RESUMEN

Las operaciones de mecanizado desempeñan un papel fundamental en la industria metalmeccánica. Su desarrollo ha dado surgimiento a lo que hoy conocemos como mecanizado de alta velocidad con el que mejora la calidad superficial, la exactitud dimensional y los tiempos de producción durante la fabricación de componentes metálicos que se obtienen por medio de operaciones de mecanizado. El desgaste de la herramienta de corte en estas operaciones es uno de los principales parámetros a controlar por su influencia directa sobre la calidad superficial, exactitud dimensional, vibraciones y tiempo de vida útil de la herramienta; razones por las cuales se estudia el comportamiento de este parámetro tanto en el sector industrial como por parte de la comunidad científica. La realización de estudios experimentales para identificar el comportamiento del desgaste demanda un alto número de recursos, que se pueden disminuir al obtener modelos predictivos basados en simulación numérica. El objetivo de este trabajo es obtener un modelo por

¹ Universidad de Holguín, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios CAD/CAM, delarosa94@uho.edu.cu

² Universidad de Holguín, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios CAD/CAM, roberto.perez@uho.edu.cu

³ Universidad de Holguín, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios CAD/CAM, carlos.trinchet@uho.edu.cu

el Método de los Elementos Finitos que permita predecir el comportamiento del desgaste de la herramienta de corte.

Palabras Claves: Fresado de Alta Velocidad, desgaste de la herramienta de corte, Método de los Elementos Finitos, modelo predictivo.

ABSTRACT

Machining operations play a fundamental role in the metalworking industry. Its development has given rise to what we know today as high speed machining with which it improves surface quality, dimensional accuracy and production times during the manufacture of metal components that are obtained through machining operations. The wear of the cutting tool in these operations is one of the main parameters to be controlled due to its direct influence on the values of surface quality, dimensional accuracy, vibrations and useful life of the tool; reasons why the behavior of this parameter is studied both in the industrial sector and by the scientific community. Performing experimental studies to identify the behavior of attrition demands a high number of resources, which can be reduced by obtaining predictive models based on numerical simulation. The objective of this work is to obtain a model by Finite Element Method that allows predicting the wear behavior of the cutting tool.

Keywords: High Speed Milling, cutting tool wear, Finite Element Method, predictive model

INTRODUCCIÓN

El mecanizado es una operación esencial en la producción de piezas metálicas, con la que se pueden obtener las dimensiones y calidad superficial deseada mediante la remoción del exceso de material en forma de viruta. Los procesos que lo conforman son parte fundamental de la industria metalmecánica y con su evolución han permitido el desarrollo de lo que hoy se conoce como mecanizado de alta velocidad (MAV). Esta tecnología facilita el trabajo con materiales y piezas de alta complejidad para el mecanizado convencional como los aceros de alta dureza y componentes con paredes muy delgadas.

El MAV surge en la década de 1920 cuando el ingeniero alemán Carl Salomon desarrolla investigaciones para fundamentar su hipótesis sobre la relación entre la temperatura y la velocidad de corte en el mecanizado. El padre del mecanizado de alta velocidad, como también se le conoce, fue el primero en explorar las ventajas de estas operaciones con un aumento considerable de la velocidad de corte. Desde entonces numerosos estudios se han desarrollado alrededor del mundo en la búsqueda de aumentar el conocimiento sobre esta tecnología. (Longbottom y Lanham, 2006) Dentro de los procesos que conforman al MAV se encuentra el fresado de alta velocidad (FAV) cuya versatilidad de movimientos y rotaciones lo convierten en la operación fundamental para la fabricación de piezas con geometrías complejas como los moldes de inyección de plástico. Entre las décadas de los 80 y 90 del pasado siglo los ensayos de FAV comienzan a tomar gran interés, convirtiéndose hoy en día en uno de los procesos más difundidos del mecanizado gracias al

desarrollo que han alcanzado las máquinas-herramienta, los controles numéricos computarizados (CNC), las tecnologías CAD/CAM/CAE, las herramientas de corte, entre otros. (Albertí, 2010)

El FAV posee un alto impacto en sectores productivos que demandan calidad y precisión como el aeroespacial, la aviación y la industria de moldes y matrices. En este último existe la necesidad de mecanizar metales con alta dureza cuya temperatura de trabajo supera los 200°C, donde además se introducen conceptos de alto rendimiento, para garantizar a los clientes un producto de excelente calidad con un corto tiempo de entrega.

Por la alta precisión dimensional y elevada calidad superficial que exigen los moldes y matrices, el desgaste de la herramienta de corte en el fresado duro de alta velocidad es uno de los parámetros necesarios a controlar. La relación directa entre el desgaste y las variables que afectan la calidad de las superficies mecanizadas provocan un aumento de los costos de producción cuando no se controla adecuadamente este parámetro, al requerir mayores esfuerzos en operaciones de acabado y pulido para cumplir con las demandas exigidas.

De forma general este comportamiento se analiza por métodos experimentales, Inteligencia Artificial y el Método de los Elementos Finitos (FEM). Los estudios sustentados por la experimentación práctica son muy costosos por eso es cada vez más frecuente el empleo de métodos numéricos para predecir y evaluar comportamientos en condiciones cercanas a la realidad. El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo por el MEF para predecir el comportamiento del desgaste de herramientas de metal duro en el FAV del acero para moldes y matrices AISI H13.

METODOLOGÍA

La modelación por métodos numéricos de los procesos de mecanizado permite obtener predicciones de parámetros de interés; como las fuerzas de corte, temperaturas, formación de virutas, tensiones y deformaciones; antes de realizar la operación de corte. Esta acción facilita optimizar y reducir costos en las líneas de producción, evitando las pruebas de fallo y error. Lo anterior no quiere decir que los métodos experimentales son obsoletos, en realidad es todo lo contrario pero la modelación reduce considerablemente el tiempo y recursos materiales del trabajo experimental.

El MEF es la herramienta de simulación numérica más utilizada para la modelación del mecanizado. Su principio básico es remplazar la configuración de un cuerpo con pequeños elementos que conforman una malla, donde cada uno de estos elementos posee una geometría mucho más simple que la estructura original. Los puntos de unión de los elementos se denominan nodos; en estos son aplicadas las condiciones de frontera y se determinan los grados de libertad que responden a las variables que se desean conocer del problema. Generalmente para obtener los grados de libertad del sistema se emplean numerosas ecuaciones algebraicas que son resueltas por potentes ordenadores. (Markopoulos, 2013)

Tanto el material de trabajo como la herramienta de corte son discretizados para realizar la simulación por el MEF. De esta forma se pueden obtener modelos físicos-matemáticos que describan el proceso de FAV en dos y tres dimensiones, pero la alta demanda computacional de los modelos en 3D constituye una desventaja. Por otra parte al realizar estudios en 2D con parámetros bien definidos se pueden obtener resultados adecuados en un menor tiempo y con un modelo más sencillo gracias a los principios del corte ortogonal.

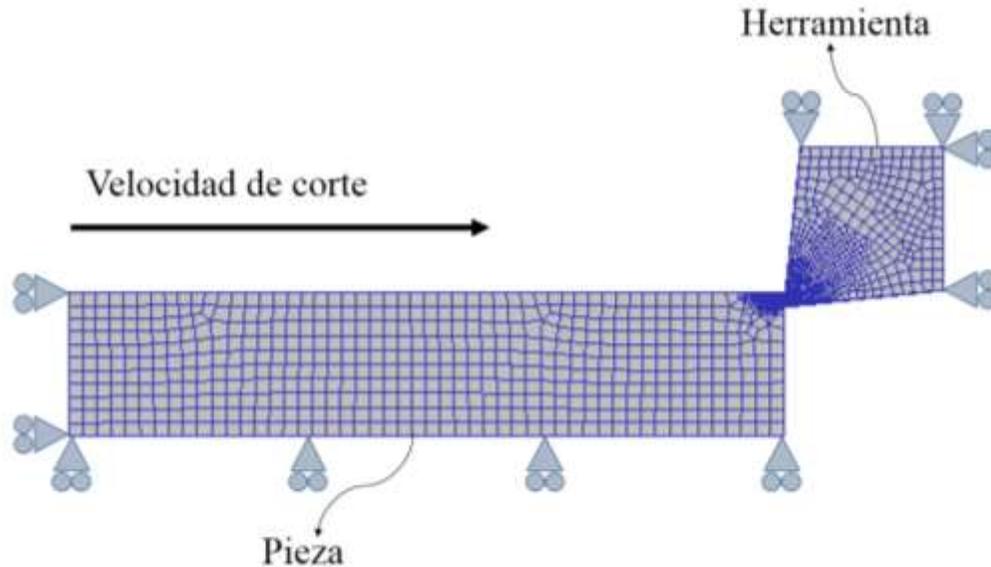


Figura 1. Representación en 2D del FAV por el MEF.

Para construir el modelo es necesario definir el tipo de formulación para la simulación por el MEF, el comportamiento termo-mecánico de los materiales, el de la fricción, la transferencia de calor y evolución del desgaste durante el proceso. A continuación se muestran algunas de las ecuaciones desarrolladas para reproducir estos comportamientos de forma numérica.

Tipo de formulación

Existen hasta el momento tres tipos de formulaciones para la simulación del mecanizado con el MEF: Euleriana, Lagrangiana y la Arbitraria Euleriana-Lagrangiana. En la formulación Euleriana la malla cubre un volumen de control en el cual fluye el material en la simulación de la formación de la viruta, presenta la desventaja de que se deben asumir o conocer de antemano de estudios experimentales parámetros que intervienen en este comportamiento.

La formulación Lagrangiana vincula los elementos finitos al material y cuando ocurre la deformación en el proceso de corte la malla se regenera en cada paso de tiempo, lo que permite una formación gradual de la viruta sin necesidad de conocer de antemano su comportamiento. Una combinación de las ventajas de los enfoques anteriores se presenta en la formulación ALE, donde la malla actúa de forma arbitraria con un desplazamiento total correspondiente a una suma del incremento del desplazamiento en la Euleriana y Lagrangiana.

Comportamiento termo-mecánico

La modelación del material es uno de los principales aspectos en la simulación del mecanizado, debido a los constantes cambios que este experimenta en sus propiedades durante el proceso de corte. Algunas de las ecuaciones que se utilizan para describir este comportamiento con el MEF se muestran a continuación.

Tabla 1. Ecuaciones para el comportamiento termo-mecánico de los materiales.

Nombre	Ecuación
Usui, Maekawa y Shirakashi	$\sigma = B \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^M e^{-kT} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^m \left\{ \int e^{kT/N} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^{-m/N} d\epsilon \right\}^N$
Oxley	$\sigma = \sigma_1 \epsilon^n$
Johnson-Cook	$\sigma = (A + B \cdot \epsilon^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right)$
Zerilli-Armstrong	Para metales con estructura cúbica centrada en el cuerpo: $\sigma = C_0 + C_1 \exp[-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\epsilon})] + C_5 \epsilon^n$ Para metales con estructura cúbica centrada en las caras: $\sigma = C_0 + C_2 \epsilon^n \exp[-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\epsilon})]$
Power law	$\sigma = c \cdot \bar{\epsilon}^n \cdot \bar{\epsilon}^m + y$

Fricción

La fricción entre la pieza y la herramienta durante el proceso de corte es otro aspecto importante, por tener una gran influencia sobre los valores de fuerzas de corte, temperaturas y desgaste. En este caso las ecuaciones que definen este comportamiento en las simulaciones se exponen en la tabla 2, siendo el de Coulomb y el de Zorev los métodos más utilizados en las simulaciones numéricas.

Tabla 2. Ecuaciones para el comportamiento de la fricción.

Nombre	Ecuación
Coulomb	$\tau = \mu \sigma$
Zorev	$\tau = \begin{cases} m \cdot k & 0 \leq l \leq l_u \\ \mu \sigma & l_u \leq l \leq l_c \end{cases}$
Usui	$\tau = k \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu \sigma}{k}\right) \right]$
Childs	$\tau = mk \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu \sigma}{mk}\right)^n \right]^{1/n}$

Evolución del desgaste

Para el caso del comportamiento del desgaste por el MEF la ecuación desarrollada por Usui, Shirakashi y Kitagawa (1978) es una de las más difundidas en los estudios de mecanizado para el comportamiento de la velocidad de desgaste. Este modelo analítico calcula la contracción del volumen que se pierde en la herramienta por unidad de área y de tiempo.

$$\frac{dW}{dt} = c_1 \cdot \sigma_n \cdot V_s \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{T}\right) \quad (1)$$

Donde $\frac{dW}{dt}$ es la velocidad de desgaste, σ_n la tensión normal, V_s la velocidad relativa en la interfase pieza-herramienta, T la temperatura de contacto, C_1 y C_2 son constantes que dependen del material de la pieza y la herramienta.

Otra de las ecuaciones que se utilizan con gran frecuencia en la descripción del desgaste abrasivo es la presentada por Archard (1953), cuya expresión matemática muestra la ecuación 2.

$$\frac{dW}{dt} = K \frac{\sigma_n^a \cdot V_s^b}{H^c} \quad (2)$$

Donde $\frac{dW}{dt}$ es la velocidad de desgaste, σ_n la tensión normal, V_s la velocidad relativa en la interfase pieza-herramienta, H la dureza del material de la herramienta y las constantes K , a , b y c son coeficientes que se determinan experimentalmente.

DESARROLLO DEL TEMA

Con el propósito de predecir el comportamiento del desgaste de herramientas de metal duro en el FAV del acero AISI H13 se obtuvo un modelo físico-matemático por el MEF. El mismo fue desarrollado en el software de formulación Lagrangiana DEFORM-2D y para seleccionar las ecuaciones que mejor simulan este proceso se compararon los resultados experimentales de Wang y Liu (2016). El parámetro utilizado para ajustar el modelo con los datos experimentales es la fuerza de corte resultante (F_r), cuya medición es uno de los métodos indirectos para el monitoreo y control del desgaste que con mayor frecuencia se utiliza en los procesos de mecanizado.

La composición química del acero AISI H13 que utilizan Wang y Liu (2016) se recogen en la tabla 3, mientras que las principales propiedades mecánicas de la herramienta de corte y el acero AISI H13 se recogen en la Tabla 4.

Tabla 3. Composición química del acero AISI H13.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)
0,32-0,45	0,8-1,2	0,2-0,5	4,75-5,5	1,1-1,75	0,8-1,2

Tabla 4. Principales propiedades mecánicas de la herramienta de corte y el acero AISI H13.

Propiedades	Herramienta	AISI H13
Módulo de Young (GPa)	425 000	210
Densidad (kg/m ³)	3 520	7 800
Resistencia a la flexión (MPa)	1 500	1 579

Dureza (HRC)	70	60-62
---------------------	----	-------

DEFORM-2D posee una base de datos que contienen el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales en función del cambio de temperaturas, lo que posibilita obtener adecuadas predicciones del comportamiento real en las simulaciones.

La herramienta de corte empleada en la experimentación es una fresa integral de metal duro sin recubrimiento. Posee cuatro dientes, una longitud de 60 mm, un diámetro de 8 mm, un ángulo de ataque radial (γ) de 10° y un ángulo de incidencia (α) de 9° . Los parámetros de corte utilizados fueron una velocidad de corte de 100 m/min, un avance por diente de 0,05 mm/z, unas profundidades de corte axial y radial de 0,5 mm y 8 mm respectivamente. Bajo estas condiciones el valor de F_r obtenido experimentalmente es de aproximadamente 275 N.

Para seleccionar el modelo que mejor se ajusta al estudio tomado como referencia se evalúan diferentes combinaciones de las ecuaciones para el comportamiento termo-mecánico, la fricción y el desgaste. Se mantienen constantes en cada caso los valores de ángulo de ataque e incidencia, los parámetros de corte, el coeficiente global de transferencia de calor y las propiedades físicas y mecánicas de la herramienta de corte y el material de trabajo.

El modelo de mayor precisión realizó la predicción de F_r con un error relativo de 1,03 % al compararlo con el valor experimental. De esta forma se logra reproducir numéricamente las condiciones del estudio de Wang y Liu (2016) con un modelo de corte ortogonal por el MEF empleando la ecuación Power law para el comportamiento termo-mecánico de los materiales, la de Coulomb para la fricción y la de Usui, Shirakashi y Kitagawa (1978) para el desgaste.

Con el modelo obtenido se simulan operaciones de acabado para moldes de inyección de plástico con los parámetros de la tabla 5, cuyas combinaciones genera un total de 32 operaciones de acabado distintas. Al predecir la degradación de la herramienta de corte, en función de la velocidad de desgaste, se pueden determinar las combinaciones de parámetros con las que se desgasta en mayor o menor medida la herramienta de corte.

Tabla 5. Niveles de parámetros de corte para la simulación.

Parámetros de corte	Niveles
Velocidad de corte (m/min)	150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500
Avance por diente (mm/z)	0,02; 0,04; 0,06; 0,1
Profundidad de corte axial (mm)	0,5
Profundidad de corte radial (mm)	8

Una vez realizadas las simulaciones se obtiene el comportamiento del desgaste al variar los parámetros de velocidad de corte (V_c) y avance por diente (f_z). En la figura 2 se puede apreciar que con el aumento de V_c y f_z se obtienen los mayores valores del desgaste en la herramienta de corte. Igual comportamiento se observa en los estudios realizados por Xiong et al. (2013) y Pereira et al.

(2018), quienes de forma experimental analizan el desgaste en fresas integrales de metal duro al mecanizar acero AISI H13.

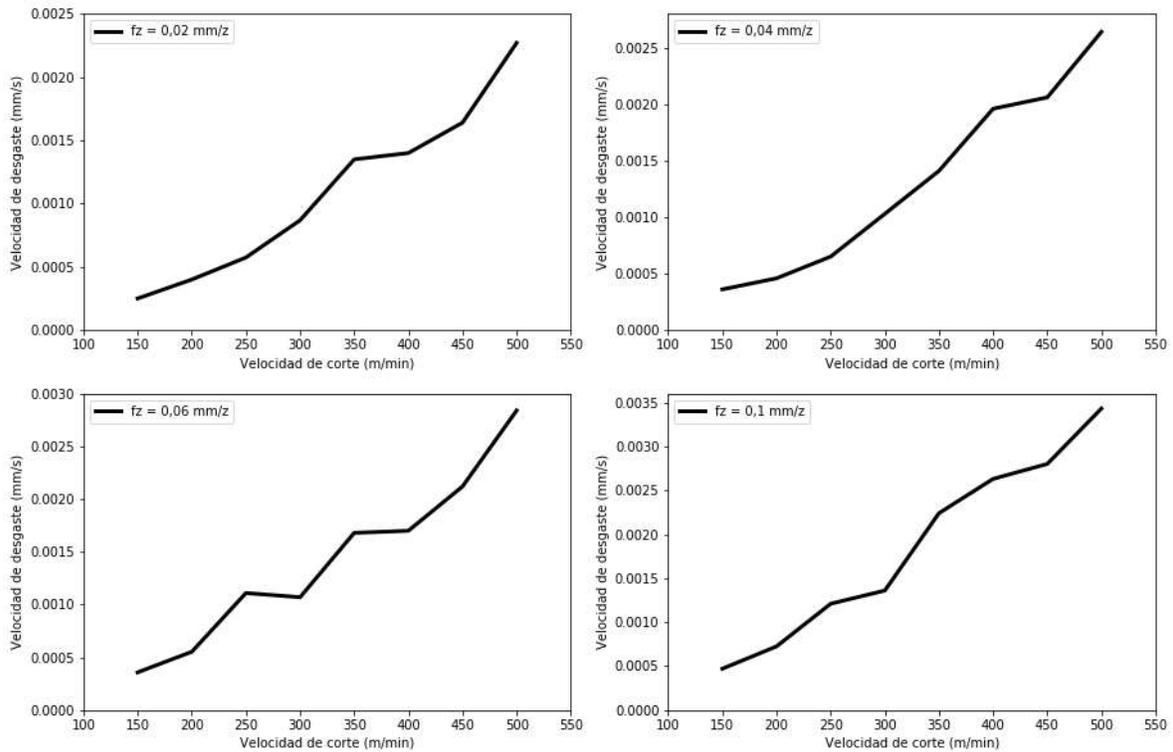


Figura 2. Relación del desgaste con los parámetros de corte.

Una de las ventajas que presentan los modelos por el MEF es que se puede visualizar la zona de la herramienta que se desgasta con mayor intensidad. En la figura 3 se observa la predicción de la velocidad de desgaste para la operación de acabado con V_c de 500 m/min y f_z de 0,1 mm/z concentrándose los mayores valores en la arista de corte y en la superficie de incidencia, siendo este comportamiento una de las principales causas que determinan la vida útil de estas herramientas.

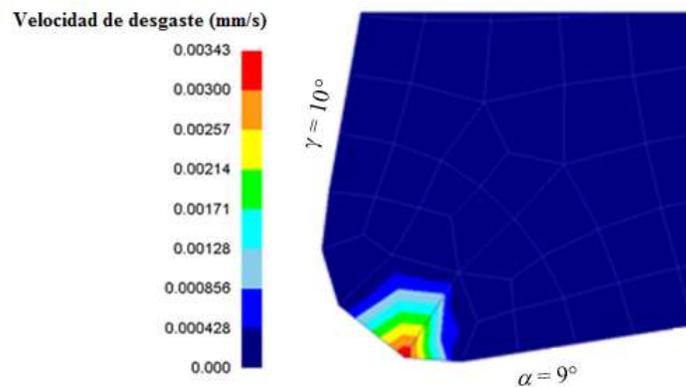


Figura 3. Distribución del desgaste en la herramienta de corte.

Con los resultados de las 32 simulaciones de operaciones de acabado que fueron simuladas, se obtiene una ecuación empírica para el comportamiento de la velocidad de desgaste por medio del método de regresión múltiple. Utilizando el módulo *Curve Fitting Tool* de Matlab R2017a, se evalúan varias ecuaciones para la predicción de estos parámetros con el objetivo de obtener las más adecuadas en cuanto a los valores del coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) y la raíz del error cuadrático medio (RECM). A continuación se muestra la ecuación seleccionada que presenta un R^2 igual a 0,976, un R^2 ajustado de 0,9724 y $RECM=1,4432 \cdot 10^{-4}$.

$$\frac{dw}{dt} = -10,43 \cdot 10^{-5} + 8,778 \cdot 10^{-7} \cdot V_c - 23,84 \cdot 10^{-4} \cdot f_z + 6,165 \cdot 10^{-9} \cdot V_c^2 + 3,602 \cdot 10^{-5} \cdot V_c \cdot f_z$$

(3)

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten afirmar que el modelo predice adecuadamente el comportamiento del desgaste para una herramienta de metal duro en el FAV del acero AISI H13. En trabajos futuros se utilizarán estos datos para obtener combinaciones óptimas de parámetros de corte en función de aumentar la productividad y disminuir el desgaste, por medio de una optimización multiobjetivo.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo un modelo por el MEF con el que se puede predecir el desgaste de la herramienta de corte en el FAV del acero AISI H13.
2. Se obtuvo una ecuación empírica que describe el comportamiento del desgaste en operaciones de acabado del acero AISI H13.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albertí, M. (2010). *Contribución al desarrollo del proceso de selección de centros de mecanizado de alta velocidad, basado en parámetros tecnológicos y de productividad* (tesis doctoral). Universidad de Girona, Girona, España.
- Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
- Longbottom, J. M., y Lanham, J. D. (2006). A review of research related to Salomon's hypothesis on cutting speeds and temperatures. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(14), 1740–1747. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.12.001>
- Markopoulos, A. P. (2013). *Finite Element Method in Machining Processes* (J. P. Davim, Ed.). <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4330-7>
- Pereira, R. B. D., Lauro, C. H., Brandão, L. C., Ferreira, J. R., y Davim, J. P. (2018). Tool wear in dry helical milling for hole-making in AISI H13 hardened steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(9–12), 2425–2439. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3129-9>
- Usui, E., Shirakashi, T., y Kitagawa, T. (1978). Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process Part 3 Cutting Temperature and Crater Wear of Carbide Tool. In *ASME* (Vol. 100).

- Wang, B., y Liu, Z. (2016). Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 55, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.11.004>
- Xiong, J., Guo, Z., Yang, M., Wan, W., y Dong, G. (2013). Tool life and wear of WC-TiC-Co ultrafine cemented carbide during dry cutting of AISI H13 steel. *Ceramics International*, 39(1), 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.06.031>