

Modelos de desgaste de herramientas: sobre la hipótesis de modelización

Tool wear models: about the modeling hypothesis

Fernando Ramírez Paredes^{1*}  <https://orcid.org/0000-0002-2156-7263>

Recibido 01 de octubre de 2021, aceptado 17 de mayo de 2023

Received: October 01, 2021 Accepted: May 17, 2023

RESUMEN

En el presente trabajo se ha realizado una revisión de los modelos de desgaste de herramientas más representativos, que han sido desarrollados en los últimos setenta años. Se ha realizado un análisis crítico de sus hipótesis de modelización en función de las características experimentales de las curvas de desgaste. Como resultado de este análisis se ha demostrado que los modelos que consideran a la tasa de desgaste como variable en el tiempo se ajustan mejor a las observaciones experimentales. La mayoría de los modelos estudiados no usan esta hipótesis.

Palabras clave: Desgaste de herramientas, mecanizado, ecuaciones de desgaste.

ABSTRACT

This work presents a chronological review of the most important wear models developed over the last seventy years. It also analyses the model's hypothesis based on experimental observations of the wear's progression. The results from this analysis show that the models which use the wear rate variable in the time have better accordance with experimental observations. This hypothesis is not used in most of the studied models.

Keywords: Tool wear, machining, wear equations.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de fabricación por arranque de viruta son parte fundamental en la industria, y participan de forma directa o indirecta en la producción de todos los artículos de uso diario [1]. Estos procesos implican el uso de herramientas de corte que han sido desarrolladas bajo amplios criterios de diseño y según los materiales que van a ser cortados. El desgaste de dichas herramientas se estima que representa entre el 18 y el 30% del coste total del proceso de producción. Todo esto ha hecho de la investigación acerca del desgaste de herramientas una línea de intensa actividad investigativa alrededor del mundo [2, 3].

La Figura 1a muestra los tipos de desgaste en la herramienta de corte y las variables para su medición. Los parámetros más usuales para estimar el desgaste son el desgaste de flanco (V_B) y el de cráter (K_T). La evolución del desgaste de herramienta para cráter y flanco comprende tres fases definidas tal y como se muestra en la Figura 1b:

- 1-2: Primera fase o desgaste inicial,
- 2-3: Segunda fase o de estabilización y
- 3-∞: Tercera fase o desgaste severo.

La fase inicial se caracteriza por una violenta interacción de tipo mecánico y el aumento de temperatura en la interfaz de contacto. En esta fase

¹ Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador. E-mail: frramirez@utn.edu.ec

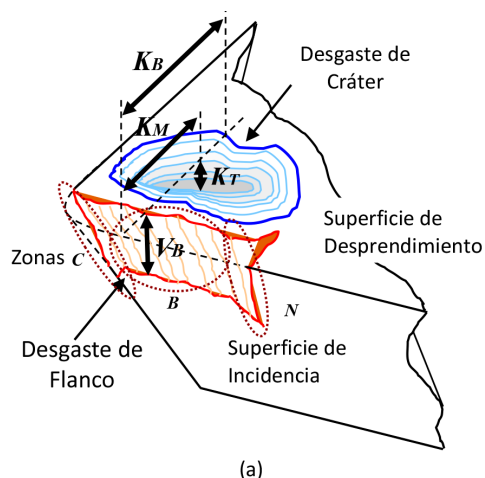
* Autor de correspondencia: frramirez@utn.edu.ec

se ha observado la aparición súbita de desgaste de flanco que, en el caso de mecanizado de acero al carbono con herramienta de carburo, tiene un promedio de 50 μm aproximadamente. La vida útil de la herramienta termina durante la fase de estabilización (antes del punto 3, Figura 1b) [4].

La correcta estimación de la vida útil de la herramienta permite el recambio oportuno de plaquita de corte o el reafilado. De este modo se previenen daños superficiales y la desviación dimensional en la pieza terminada [5].

El estudio de la vida de la herramienta y su estimación se remontan a inicios del siglo XX. Frederick W. Taylor observó la correlación existente entre la vida útil de la herramienta y la temperatura que alcanza la herramienta durante el proceso de corte. A su vez, notó que uno de los parámetros de corte que más afectaba la temperatura de herramienta era la velocidad de corte. En base a esto propuso una ecuación para la estimación de la vida de la herramienta (t), basado en la velocidad de corte (v), una velocidad de corte referencial (v_r), la vida de herramienta a dicha velocidad referencial (t_r) y una constante de calibración (n), (ecuación (1)) [7]. Luego de este modelo inicial se han propuesto variaciones de la ecuación (1) con parámetros adicionales de corte que apuntan a estimar la vida de la herramienta con mayor precisión [3, 8, 9].

$$t = t_r \left(\frac{v_r}{v} \right)^{1/n} \quad (1)$$



Por otro lado, desde mediados del siglo XX se han propuesto modelos que definen la pérdida de material por desgaste y su evolución en el tiempo como una función de variables físico-químicas y parámetros de corte. Para la estimación de la vida de la herramienta con este tipo de modelos se utilizan grados de desgaste aceptados bajo normativa específica [10]. Así, la utilidad de la herramienta se da por finalizada cuando el grado de desgaste alcanzado es el que impone la norma.

MODELIZACIÓN DEL DESGASTE DE HERRAMIENTAS

El proceso de modelización del desgaste sigue los lineamientos generales para la construcción de un modelo matemático. Se inicia con la definición y delimitación del sistema a modelar. En el caso del desgaste de herramientas suele enfocarse en desgaste de cráter o desgaste de flanco según la zona de contacto a analizar. Continúa con el planteamiento de una hipótesis de desgaste que a su vez permite la selección de parámetros y variables que van a ser usadas en el modelo. En este punto se define el dominio de modelización en función de las variables seleccionadas y los datos experimentales de partida. Se establecen las relaciones entre variables de modelización mediante herramientas de modelización matemática y principios físicos. Se aplica el modelo resultante y se somete a un proceso de validación. El proceso de validación se fundamenta en la comparación entre resultados obtenidos con el modelo propuesto y valores experimentales de

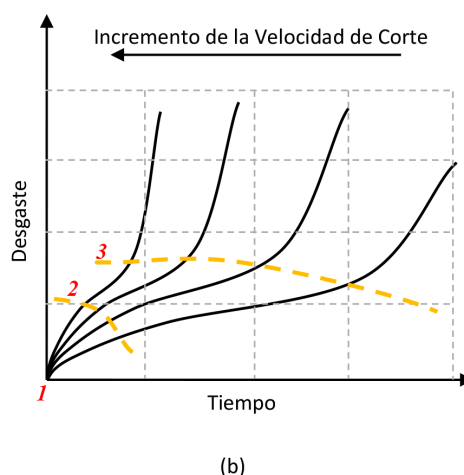


Figura 1. Desgaste de herramientas de corte y variables de evaluación del desgaste [6].

desgaste. Los datos experimentales utilizados en la validación del modelo deben ser distintos a los datos de partida en la modelización. De este modo se confirma la efectividad del modelo [11].

Una de las dificultades que presenta la modelización del desgaste de herramientas es la observación experimental de las variables en interfaz de contacto. Para solventar este problema se han desarrollado distintos métodos y técnicas que van desde la utilización de medios ópticos para la estimación de las temperaturas, el uso de termopares embebidos en la herramienta de corte y modelos analíticos y numéricos para estimar las temperaturas, presiones y velocidades relativas en interfaz de contacto [12, 13].

La hipótesis de desgaste: parámetro de clasificación de modelos

Una vez delimitado el sistema a estudiar, la hipótesis de desgaste es punto fundamental para llevar a cabo el proceso de modelización. Esta idea inicial se plantea tomando en consideración dos aspectos fundamentales:

- Cuáles son los mecanismos de desgaste que van a ser abordados, es decir, si se considera un desgaste de tipo abrasivo, adhesivo, difusivo, corrosivo u otro. Esto es importante puesto que en base a esta suposición se seleccionan las variables para la construcción del modelo.
- Cómo se define la tasa de desgaste respecto al tiempo. Este aspecto es fundamental a la hora de predecir la evolución del desgaste. Se puede considerar la tasa de desgaste constante o variable en el tiempo.

En la interfaz de contacto entre pieza mecanizada y herramienta de corte se alcanzan condiciones extremas de temperatura, presión de contacto y velocidad relativa de deslizamiento entre superficies. Estas variables se presentan distribuidas en la interfaz de contacto de manera no uniforme, de tal modo que actúan simultáneamente y en distintas proporciones sobre la superficie de la herramienta.

La combinación de temperatura, presión y velocidad relativa en distintas proporciones propicia la acción de distintos mecanismos de desgaste sobre la superficie de la herramienta. Así, en puntos de altas presiones y temperaturas habrá una tendencia a la pérdida de material de herramienta por adhesión. Con altas

velocidades relativas y presión se perderá material por abrasión. Las altas temperaturas propician desgaste de tipo químico, difusivo y agudizan los demás mecanismos al incidir en el comportamiento del material de la herramienta.

Como consecuencia de esta dinámica los investigadores a lo largo de la historia han propuesto modelos que se enfocan en uno o varios mecanismos de desgaste combinado, aplicados en cráter o flanco.

Revisión de modelos

En el presente trabajo se realiza la revisión de modelos que cuantifican la tasa de desgaste de herramienta como una función de variables termo-mecánicas y su comportamiento en el tiempo. La combinación de estas variables obedece a uno o varios mecanismos de desgaste como fenómeno físico. Este análisis excluye a las ecuaciones que estiman la vida de la herramienta en base a un parámetro o variable de corte (ecuación (1)).

Debido a la complejidad del fenómeno del desgaste, los modelos analizados permiten en general una aplicación y validez limitada por la combinación de materiales de herramienta y pieza mecanizada, también por el tipo de operación de mecanizado y por los parámetros de corte entre otros factores. Cada modelo revisado en este trabajo se fundamenta en una hipótesis de desgaste que se muestra en la Tabla 1.

A continuación, se muestran en detalle los modelos de desgaste clasificados en la Tabla 1.

Modelo Abrasivo-Adhesivo con tasa de desgaste constante

En 1953 se propone un modelo de desgaste mecánico en función de la velocidad relativa, la presión de contacto y las durezas del material desgastado (más blando). Aunque este modelo no fue planteado específicamente para el desgaste de herramientas, ha sido aplicado en este campo [14] [15, 16]. Estas aplicaciones se realizaron en la predicción del desgaste de herramientas de carburo sin recubrimiento y de acero rápido (H11), en el corte de acero al carbono (AISI 1025-1045) como material de pieza (ecuación (2)).

$$\frac{dW}{dt} = K_1 \frac{(v_s)^{K_2} (F_n)^{K_3}}{H^{K_4}} \quad (2)$$

Tabla 1. Clasificación de modelos de desgaste de herramientas según su hipótesis de modelización.

Modelo	Hipótesis de desgaste					
	Mecanismos de desgaste				Tasa de desgaste	
	Adhesivo	Abrasivo	Difusivo	Otro Termo-activado	Constante	Variable
Archard (1953)	x	x			x	
Takeyama-Murata (1963)		x	x		x	
Usui (1978)	x		x		x	
Mathew (1989)			x		x	
Kitagawa (1997)	x	x		x	x	
Zhao (2002)	x	x		x		x
Molinari-Nouari (2002)			x			x
Filice (2007)			x	x	x	
Palmai (2013)	x	x		x		x
Ramírez (2017)	x	x		x		x

Donde v_s es la velocidad relativa de deslizamiento, que al aplicarse a desgaste de flanco puede asumirse como la velocidad de corte del material, F_N es la fuerza normal en interfaz de contacto, H es la dureza del material de la herramienta y K_i con $i = 1, \dots, 4$, son constantes a calibrar experimentalmente.

En este estudio los investigadores pudieron observar que el desgaste máximo en superficie de desprendimiento se incrementa con la velocidad de corte y con el ángulo de desprendimiento. También se simularon perfiles de desgaste generados por elementos finitos, realizándose un análisis cualitativo de estas simulaciones[16].

Está demostrado que la temperatura es una de las variables principales en un sistema tribológico ya que modifica las propiedades de los materiales. Este modelo originalmente no toma en cuenta de forma directa el efecto de la temperatura en la estimación del desgaste y esto limita su rango de utilidad. Sin embargo, modificado con activación térmica de desgaste, ha sido el fundamento para modelos posteriormente propuestos [17].

Modelo Abrasivo-Difusivo con tasa de desgaste constante

En 1956 se propuso un modelo de desgaste de herramientas de tipo difusivo que fue complementado con un efecto de desgaste mecánico y validado experimentalmente en 1963 (ecuación (3)) [18]. Este es el conocido modelo de Takeyama-Murata [19].

$$\frac{dw}{dt} = A \cdot V_c + B \cdot \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \quad (3)$$

En donde A, B y K son constantes del modelo, E es la energía de activación del proceso de difusión y T la temperatura. Este modelo fue originalmente calibrado para herramienta de carburo P10 y K20, con corte de hierro fundido FC30 y acero aleado G18B. Este modelo fue calibrado originalmente en base a la medición de temperaturas en flanco, aunque se ha aplicado tanto para estimar desgaste de flanco como de cráter con modificaciones en las constantes de calibración.

La modelización de Takeyama-Murata se centra en la dependencia que muestra la tasa de desgaste con la temperatura. De este modo, se observaron dos etapas de desgaste. Una etapa inicial en la que predomina el desgaste mecánico (abrasivo-adhesivo), y otra en la que predomina un desgaste termo-activado (difusivo) a partir de los 1200 K aproximadamente. Este comportamiento ha sido evidenciado por varios investigadores posteriormente [20, 21]. En la Figura 2 se observan claramente estas dos etapas.

La efectividad de este modelo para la predicción del desgaste se incrementa en procesos con altas temperaturas, es decir: Altas velocidades, avances y profundidades de corte. Esta ecuación es particularmente importante porque ha servido

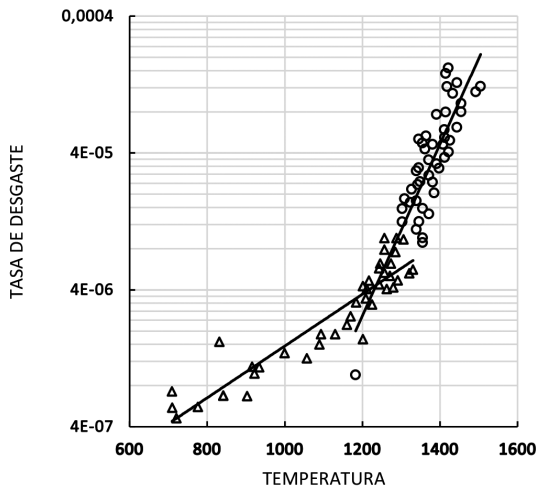


Figura 2. Observación experimental de la dependencia de la tasa de desgaste de herramienta (flanco) con la temperatura. Materiales: pieza aleación G18B y herramienta de carburo sin recubrimiento P10 (ISO) [19].

de base para el desarrollo de distintos modelos a lo largo de la historia.

Modelo Adhesivo – Difusivo con tasa de desgaste constante

En 1978 se desarrolló un modelo de desgaste adhesivo-difusivo (ecuación (4)).

$$\frac{dw}{dt} = A \cdot P \cdot V_s \cdot \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \quad (4)$$

En donde A y K son constantes del modelo, E es la energía de activación del proceso de difusión y T la temperatura. V_s es la velocidad relativa entre superficies en contacto y puede reemplazarse por la velocidad de corte del proceso para cálculo de desgaste de flanco. Este modelo fue originalmente calibrado para herramienta de carburo P10 y K20, con corte de hierro fundido FC30 y acero aleado G18B [22].

Modelo Difusivo con tasa de desgaste constante

Este modelo fue propuesto en 1989 (ecuación (5)), basado en la ecuación (3), con la salvedad de que elimina la influencia de las variables mecánicas. El modelo ha sido calibrado y validado utilizando teorías analíticas para estimación de temperatura en corte ortogonal [23, 24].

$$\frac{dw}{dt} = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (5)$$

En donde A y B son constantes y T la temperatura. Este modelo fue calibrado para carburo grado 370 como material de herramienta y acero 0,2%C y 0,38%C como material mecanizado.

Modelo Adhesivo-Abrasivo con activación térmica y tasa de desgaste constante

La temperatura es una de las variables más influyentes en los procesos de desgaste mecánico puesto que modifica las propiedades de los materiales. Así, en 1997 se propone un modelo en el que se toma en cuenta los mecanismos de adhesión y abrasión activadas por la temperatura (ecuación (6)).

$$\frac{1}{P} \frac{dw}{dt} = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{T}\right) + C_1' \cdot \exp\left(-\frac{C_2'}{T}\right) \quad (6)$$

Donde C_1 , C_2 , C_1' y C_2' , son constantes del modelo relacionadas a los mecanismos de desgaste modelados. P y T son la presión y temperatura de contacto, respectivamente. Este modelo fue calibrado para herramientas de corte cerámicas y de carburo (P20 y P40), combinadas con aceros de medio y bajo carbono, así como aceros aleados [25].

Modelo Difusivo con coeficiente variable con la temperatura y tasa de desgaste constante

Este modelo fue propuesto en 2007 y modifica el modelo de Takeyama-Murata añadiendo un coeficiente C que es variable con la temperatura (ecuación (7)).

$$\frac{dW}{dt} = C \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (7)$$

Donde E es la energía de activación del proceso de difusión. R es la constante universal de los gases y T la temperatura de contacto. Este modelo fue calibrado para herramientas de carburo sin recubrimiento y acero con 0,2% de carbono, y aplicado a desgaste de cráter y flanco [4].

Modelo adhesivo-abrasivo con activación térmica y tasa de desgaste variable

En 2002 se propone un modelo adhesivo-abrasivo con tasa de desgaste variable en el tiempo, para estimar el desgaste de flanco en una herramienta con disipación de calor [26]. El modelo se muestra en la ecuación (8).

$$\frac{dW}{dt} = \frac{K}{3} \left(\frac{2V_s F_T}{Hw^2 \tan \gamma} \right)^{1/3} t^{-2/3} \quad (8)$$

Donde K es una constante del modelo, V_s es la velocidad de deslizamiento entre superficies, γ es el ángulo de incidencia, F_T es la fuerza de empuje, w es la profundidad de corte en corte ortogonal, H es la dureza del material de la herramienta y se la puede considerar variable con la temperatura. Esto hace que la tasa de desgaste no sea constante durante el proceso de mecanizado.

Modelo difusivo con tasa de desgaste variable

En 2002 Molinari y Nouari proponen su modelo de desgaste basado en difusión [27]. Este modelo se fundamenta en las leyes de Fick de difusión. El proceso de calibración implica el establecimiento de constantes de difusión dinámica entre componentes del material de la herramienta hacia la viruta. El modelo se muestra en la ecuación (9).

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{\rho^0 \sqrt{\pi t}} \sum_{i=1}^n (C_{i1}^0 - C_{i2}^0) \sqrt{D_i \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)} \quad (9)$$

Donde E es la energía de activación del proceso de difusión, ρ es la densidad del material de la herramienta, C son concentraciones del i -ésimo componente en 1: herramienta y 2: pieza. Los superíndices 0 indican condición inicial en el proceso de desgaste. D_i es el coeficiente de difusión del i -ésimo componente.

Modelo adhesivo-abrasivo con activación térmica y tasa de desgaste variable

Este modelo abarca los mecanismos de adhesión, abrasión y mecanismos termo-activados, basándose también en los modelos de Takeyama-Murata y Usui [28]. Este modelo se muestra en la ecuación (10).

$$\frac{dW}{dt} = \frac{V_s}{W} \left[A + B \cdot \exp\left(-\frac{C}{V_s^x + KW}\right) \right] \quad (10)$$

Donde A , B , C , K y x son constantes de calibración. Este modelo introduce el tiempo en la tasa de desgaste de forma implícita. Esto es, en lugar de introducir la variable tiempo t de forma directa, lo que hace es describir la Temperatura de interfaz de contacto como una función del desgaste. Como el desgaste varía en el tiempo, la temperatura de flanco también varía con el tiempo de manera indirecta.

Esta característica diferencia a este modelo de los demás mostrados en este trabajo.

Modelo adhesivo-abrasivo con activación térmica y tasa de desgaste variable

En 2017 se desarrolla una metodología de modelización de desgaste basada en un método analítico - numérico [21]. Como resultado se obtuvo el modelo representado en la ecuación (11).

$$\frac{dW}{dt} = K \cdot \left(\frac{PT^7}{4\sqrt{V_s^3}} \right)^n t^{4-5n} \quad (11)$$

Donde K y n son constantes de calibración. La constante K depende de las características del material desgastado y la energía de activación propia de procesos difusivos. En este modelo se puede notar los niveles de influencia que tienen las tres variables características de desgaste, la presión, la velocidad relativa y la temperatura de contacto, siendo esta última la que más influye en el proceso de desgaste. El modelo originalmente describe la distribución espacial del cráter en la superficie de desprendimiento y su evolución en el tiempo. La versión mostrada en la ecuación (11) describe la evolución del cráter máximo en el tiempo de corte. Aunque la modelización se ha realizado para desgaste de cráter, con las consideraciones necesarias de calibración puede aplicarse para predicción de desgaste de flanco.

ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE DESGASTE

El análisis de los modelos de desgaste de herramientas presentados en este trabajo se realiza en base a sus hipótesis de desgaste. Fundamentalmente el enfoque está en los mecanismos de desgaste que se modelizan y en la variabilidad de la tasa de desgaste en el tiempo. Estos dos componentes permiten desarrollar modelos aplicables en distintos rangos de parámetros de corte.

Variables y sus mecanismos de desgaste asociados

Se define una variable de desgaste como una variable física o química que actúa en una superficie y gracias a la cual se activa determinado mecanismo de desgaste [6]. En las ecuaciones (2)-(11) se muestran los modelos de desgaste de herramientas más representativos desde mediados del siglo XX. Las variables de desgaste presentes de forma directa

en ellos son la presión de contacto P , la velocidad relativa V_s y la temperatura de contacto T . De forma indirecta también se puede observar la presencia de la temperatura del material desgastado en variables intermedias como por ejemplo la dureza del material en el modelo de Archard (ecuación (2)).

Cada uno de estos modelos muestra la acción de uno o más mecanismos de desgaste identificados por las variables en la ecuación. Así, el efecto de adhesión está representado por la presión normal de contacto P , la abrasión por una combinación entre presión de contacto y velocidad relativa entre superficies V_s , y los procesos de desgaste difusivos o con activación térmica, por el predominio de la temperatura de contacto T .

Es importante hacer notar que las variables de desgaste tienen un comportamiento dinámico que depende de los parámetros de corte, de las propiedades de los materiales y de la geometría del contacto entre pieza y herramienta. Si cambia alguno de estos factores las variables de desgaste se ven afectadas también. Considerando que el desgaste modifica la geometría del contacto se puede concluir que el comportamiento dinámico de las variables de desgaste a lo largo del proceso de mecanizado es de difícil predicción y requiere gran profundización en el tema. Debido a este particular, para la estimación del desgaste de herramienta los modelos presentados en este trabajo utilizan valores de P , V_s y T correspondientes al estado estable, asumiéndolos como constantes [6, 19].

GENERALIZACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE MODELIZACIÓN

Modelos con tasa de desgaste constante

En base a las observaciones realizadas sobre las variables de desgaste, los modelos con tasa de desgaste constante pueden ser generalizados analíticamente tal como se muestra en la ecuación (12).

$$\frac{dW}{dt} = f(P, V_s, T, \alpha) \quad (12)$$

Donde W representa el desgaste de la herramienta, t es el tiempo de corte, P , V_s , y T son las variables de desgaste en estado estable y α es el conjunto de constantes de calibración del modelo. La hipótesis de modelización se ve representada en la función

$f(P, V_s, T, \alpha)$, mostrando en esta función si el modelo es adhesivo, abrasivo, difusivo o una combinación de diversos mecanismos de desgaste. La variable W puede estar expresada en volumen o masa. También el desgaste puede estar caracterizado por la profundidad de cráter (K_T) o longitud de flanco (V_B).

La integración de la ecuación (12) permite encontrar la cantidad de material perdido en un tiempo de mecanizado $\Delta t = t - t_0$. Esto hace que la cantidad de material perdido por desgaste se estime tal como muestra la ecuación (13).

$$W = f(P, V_s, T, \alpha) \Delta t \quad (13)$$

El hecho de considerar una tasa de desgaste constante en el tiempo implica que la función $f(P, V_s, T, \alpha)$ es la pendiente de una recta en el tiempo, es decir que se considera la evolución del desgaste como lineal.

Modelos con tasa de desgaste variable

La generalización de un modelo con tasa de desgaste variable implica que en la función $f(P, V_s, T, \alpha)$ de la ecuación (12) intervenga el tiempo como una variable adicional. Esto puede lograrse de forma directa incluyendo al tiempo en la función f tal que $f(P, V_s, T, \alpha) \rightarrow f(P, V_s, T, \alpha, t)$ (ecuaciones (8), (9) y (11)). La forma indirecta requiere que al menos una de las variables en la función f dependa del tiempo o del nivel de desgaste de la herramienta (ecuación (10)). Esto implica el conocimiento de la relación funcional de la variable de desgaste en el tiempo lo que puede hacerse mediante regresiones de resultados experimentales [28].

Así, en el presente trabajo se generaliza el modelo con tasa de desgaste variable tal como muestra la ecuación (14).

$$\frac{dW}{dt} = f(P, V_s, T, \alpha, t) \quad (14)$$

Integrando la ecuación (14) se obtiene la estimación del desgaste como función del tiempo y variables de desgaste tal como lo muestra la ecuación (15)

$$W(t) = \int_{t_0}^t f(P, V_s, T, \alpha, t) dt \quad (15)$$

El resultado final depende de la estructura que presente la función $f(P, V_s, T, \alpha, t)$ como puede verse

en las ecuaciones (8)-(11). Las tendencias observadas experimentalmente sugieren que un modelo con tasa de desgaste variable en el tiempo mostraría mayor coherencia para la predicción de la evolución del desgaste. Sin embargo, esta observación debe tomar en cuenta si el modelo aborda desgaste de cráter o flanco en la herramienta de corte [29, 30].

ANÁLISIS DE LA PREDICCIÓN DEL DESGASTE

Este análisis se ha realizado con base en la modelización de desgaste de flanco en mecanizado de acero al carbono (C20-45) con herramienta de carburo de wolframio (CW) plana y sin recubrimientos. Se proponen dos modelos para la estimación de desgaste de flanco con las siguientes hipótesis de modelización:

- H-I: Desgaste abrasivo con tasa de desgaste constante.
- H-II: Desgaste abrasivo con tasa de desgaste variable en el tiempo.

En la Figura 3 se muestra esquemáticamente un sistema de corte enfocado en la geometría del desgaste de flanco. Este tipo de desgaste se produce en la superficie de incidencia de la herramienta y se caracteriza por su longitud V_B . La vida de la herramienta de corte se define en función de este parámetro para materiales y velocidades de corte convencionales [10].

El desgaste superficial por abrasión se produce en presencia de velocidades relativas entre superficies rugosas y es potenciado por altas temperaturas. Experimentalmente se ha observado que en procesos de mecanizado la temperatura en interfaz de contacto

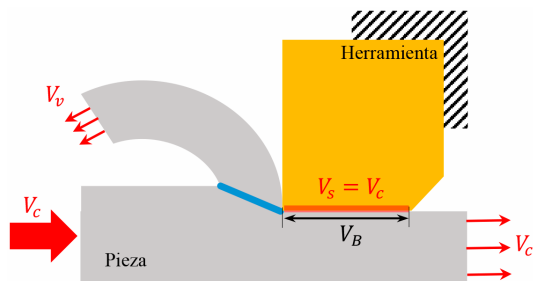


Figura 3. Vista lateral de pieza y herramienta de corte con desgaste de flanco (V_B).

depende significativamente de la velocidad de corte del proceso [30]. Considerando que la velocidad relativa V_s en el flanco coincide con la velocidad de corte V_c , esta es la variable de modelización en este análisis.

En la Figura 4 se muestra información experimental tomada de la literatura especializada con velocidad de corte variable. Esta información ha sido utilizada para la modelización y validación de los modelos desarrollados [26, 28, 29].

Con base en las dos hipótesis de modelización H-I y H-II se proponen la ecuación (16) y la ecuación (17), respectivamente.

$$\frac{dV_{B-I}}{dt} = \alpha_1 \exp(b_1 V_c) \quad (16)$$

$$\frac{dV_{B-II}}{dt} = \alpha_2 t^{b_2} \quad (17)$$

Donde α_1 , α_2 , b_1 , b_2 son constantes a determinar en la calibración. La ecuación (16) muestra una tasa de desgaste que permanece constante en el tiempo y solamente depende de la velocidad de corte V_c . De forma indirecta se considera el efecto de la temperatura en esta ecuación por su relación directa con V_c . La ecuación (17) muestra la tasa de desgaste dependiente de V_c y también del tiempo. Esta característica muestra coherencia con la información experimental mostrada en la Figura 4.

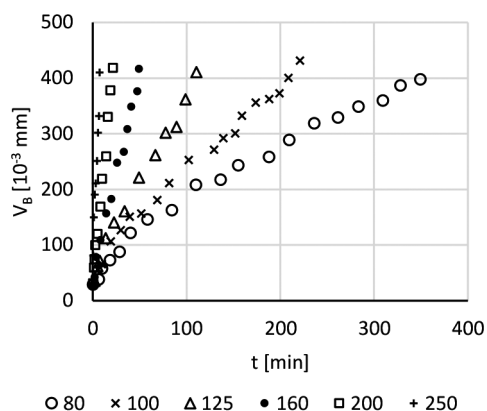


Figura 4. Evolución de desgaste de flanco en corte de acero al carbono C20-45 con herramienta de carburo plana y sin recubrimientos (V_B). Velocidad de corte 80-250 m/min. [28]

Para realizar la calibración de los modelos propuestos de V_B se integran la ecuación (16) y la ecuación (17) obteniéndose los modelos mostrados en la ecuación (18) y la ecuación (19).

$$V_{B-I} = k_1 \exp(k_2 V_c) t + k_3 V_c + k_4 \quad (18)$$

$$V_{B-II} = m_1 \exp(m_2 V_c) t^{M_3} \quad (19)$$

Donde k_i y m_i con $i = 1:4$, son constantes de calibración (Tabla 2).

Tabla 2. Constantes de calibración de los modelos de V_B .

i	1	2	3	4
K_i	0,1801	0,0226	-0,2636	86,049
m_i	10,566	0,0092	0,51985	—

Una vez realizada la calibración de los modelos los resultados de las estimaciones se muestran en la Figura 5.

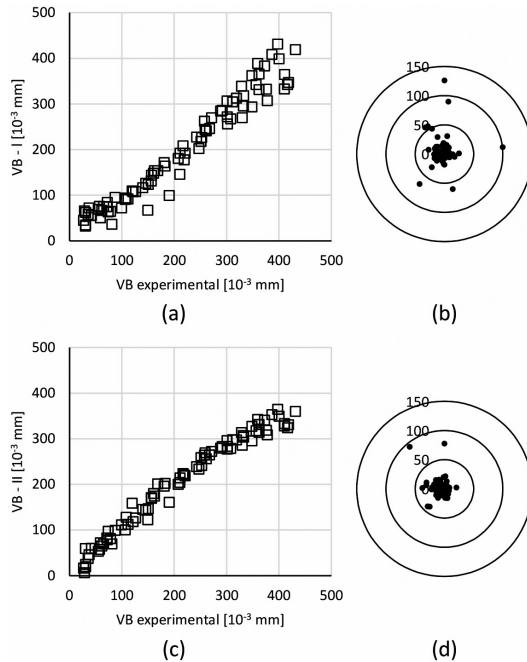


Figura 5. Calibración de modelos: En (a) y (c), comparación de resultados estimados con ecuaciones (18) y (19) con los datos de modelización (Figura 4). En (b) y (d), error absoluto de aproximación en porcentaje.

Una vez realizada la calibración de los modelos se procede a la validación. Para esto se realiza la comparación de los resultados con un conjunto de datos de desgaste distinto al utilizado en la calibración. La Figura 6 muestra los resultados de la validación.

Se han propuesto dos modelos de desgaste de flanco para mecanizado de acero al carbono (C20-45) con herramienta de carburo sin recubrimiento ni lubricación. Estos dos modelos se han desarrollado considerando desgaste abrasivo, tasa de desgaste constante en el tiempo (ecuación (18)) y con variación en el tiempo (ecuación (19)). La variable de modelización es la velocidad de corte. Los dos modelos se validaron mostrando tendencias coherentes con observaciones experimentales tomadas de la literatura especializada.

En el proceso de modelización se lograron errores de aproximación promedio de 17% considerando tasa de desgaste constante y 12% considerando tasa

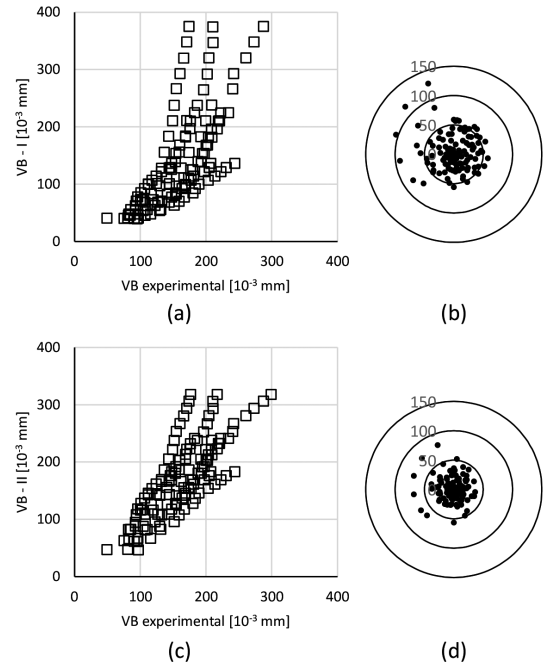


Figura 6. Validación de modelos: En (a) y (c), comparación de resultados calculados con las ecuaciones (18) y (19), con datos experimentales distintos a los de modelización [31]. En (b) y (d), error absoluto de aproximación en porcentaje.

de desgaste variable. En la validación de modelos se obtuvieron errores de aproximación promedio de 34% y 21% respectivamente. El aumento del error se debe a que en la modelización se tomó como única variable de modelización a la velocidad de corte, en tanto que en el conjunto de datos para validación también se varió el avance.

La consideración de tasa de desgaste constante se ajusta mejor a la zona II de desgaste estable en las curvas de desgaste, en tanto que la tasa de desgaste variable refleja mejor el comportamiento en las zonas I y III de las curvas de desgaste (Figura 1(b)). La presencia de un flanco súbito en los primeros minutos de mecanizado también altera las curvas de desgaste. Esto incide también en la estimación con los modelos propuestos.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han propuesto dos modelos para calcular el desgaste de flanco en herramientas de carburo y mecanizado de acero al carbono C20-C45, sin lubricación. En la modelización se ha considerado tanto tasa de desgaste constante como variable en el tiempo. El desgaste de flanco se da sobre todo por abrasión, por lo que se ha utilizado la velocidad de corte como variable de modelización. Los modelos han sido validados con información experimental tomada de la literatura especializada con resultados satisfactorios.

En el proceso de modelización del desgaste se debe definir de forma precisa la hipótesis de modelización. Esto se evidencia en la clasificación y el análisis de los modelos de desgaste de herramientas para corte de metal, realizada en este trabajo. Se han analizado los modelos más representativos, desarrollados desde mediados del siglo XX. Esta clasificación se ha realizado en función de los mecanismos de desgaste que cada modelo aborda, y de la consideración de variabilidad de la tasa de desgaste en el tiempo, que cada modelo presenta. Estos dos aspectos conforman la hipótesis de modelización.

En los modelos analizados en este trabajo se toman como variables de desgaste la presión de contacto, la velocidad relativa entre superficies y la temperatura en interfaz de contacto entre pieza y herramienta. La acción combinada de estas variables en la superficie de la herramienta, activa uno o varios mecanismos

de desgaste. Según el mecanismo de desgaste los modelos de desgaste se clasifican en adhesivos, abrasivos, difusivos o combinación de ellos. Según su comportamiento temporal, los modelos de desgaste se clasifican en aquellos que consideran tasa de desgaste variable o constante en el tiempo.

Las condiciones de corte influyen de forma significativa en la tasa de desgaste. Así, es probable que para la misma combinación de materiales de herramienta y pieza mecanizada, actúen distintos mecanismos de desgaste dependiendo de la velocidad, el avance y la profundidad de corte.

Se observa que los modelos con tasa de desgaste variable se ajustan de forma coherente a las tendencias experimentales en todo el rango de velocidades tomado como referencia en el análisis, en tanto que los modelos con tasa de desgaste constante logran predicción del desgaste aceptable para procesos de altas velocidades de corte y en zona de desgaste estable.

Este estudio muestra que, a la hora de modelizar desgaste, el considerar tasa de desgaste variable en el tiempo amplía el rango de aplicabilidad del modelo generado.

REFERENCIAS

- [1] M.C. Shaw, "Typical Cutting Operations," in *Metal Cutting Principles*, 2nd ed. Oxford, England: Oxford University Press, 2005, ch. 2, pp. 9-14.
- [2] F. Klocke and G. Eisenblaetter, "Dry cutting," *CIRP Annals*, vol. 46, no. 2, pp. 519-526, 1997, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60877-4.
- [3] H. Sun, Y. Liu, J. Pan, J. Zhang, and W. Ji, "Enhancing cutting tool sustainability based on remaining useful life prediction," *J. Clean. Prod.*, vol. 244, p. 118794, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118794.
- [4] L. Filice, F. Micari, L. Settineri, and D. Umbrello, "Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools," *Wear*, vol. 262, no. 5-6, pp. 545-554, 2007, doi: 10.1016/j.wear.2006.06.022.
- [5] E.M. Trent and P.K. Wright, "Cutting Tool Materials I: High Speed Steels," in *Metal Cutting*, 4th ed. Oxford, England: Butterworth - Heinemann, 2000, ch. 6, pp. 132-174.

- [6] F. Ramírez Paredes, "Modelización de la evolución del desgaste en herramientas de corte", Tesis Doctoral, Univ. Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, España. [En línea]. Disponible: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/22408>
- [7] F.W. Taylor, "On the art of cutting metals," in *Trans. ASME*, vol. 28, California, USA: American society of mechanical engineers, 1906, pp. 31-248.
- [8] J.A. Arsecularatne, "On prediction of tool life and tool deformation conditions in machining with restricted contact tools," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 7, pp. 657-669, 2003.
- [9] J. Chen, W. Liu, X. Deng, and S. Wu, "Tool life and wear mechanism of WC-5TiC-0.5VC-8Co cemented carbides inserts when machining HT250 gray cast iron," *Ceramics International*, Vol. 42, no. 8, 2016, pp. 10037-10044.
- [10] *Tool life testing with single point turning tools*, ISO 3685-1993, International Organization for Standardization, 1993. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/9151.html>
- [11] K. Velten, "Mechanistic Models I: ODEs" in *Mathematical Modeling and Simulation: Introduction for Scientists and Engineers*, 1st ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2009, ch. 3, pp. 117-229.
- [12] M. Saez-de-Buruaga, D. Soler, P.X. Aristimuño, J. A. Esnaola, and P.J. Arrazola, "Determining tool/chip temperatures from thermography measurements in metal cutting," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 145, pp. 305-314, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.051.
- [13] A. Gregorio, T. Santos, R. Rossi, A.M.P. Jesus, J.C. Outeiro, and P.A.R. Rosa, "Tribology of metal cutting: Newly formed underside of chip," in *Procedia CIRP*, 2019, vol. 82, pp. 136-141, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.034.
- [14] J.F. Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," *J. Appl. Phys.*, vol. 24, pp. 981-988, 1953.
- [15] M.C. Shaw and S.O. Dirke, "Microtecnic," *Microtecnic*, vol. 10, no. 4, p. 187, 1956.
- [16] E. Ceretti, P. Fallböhmer, W.T. Wu, and T. Altan, "Application of 2D FEM to chip formation in orthogonal cutting," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 59, no. 1-2, pp. 169-180, 1996, doi: 10.1016/0924-0136(96)02296-0.
- [17] E. Usui, T. Shirakashi, and T. Kitagawa, "Analytical prediction of cutting tool wear," *Wear*, vol. 100, no. 1-3, pp. 129-151, 1984, doi: 10.1016/0043-1648(84)90010-3.
- [18] K. Trigger and B. Chao, "The mechanism of crater wear of cemented carbide tools," *Journal Fluids Engineering*, vol. 78, no. 5, p. 1119, 1956, doi:10.1115/1.4013947.
- [19] H. Takeyama and R. Murata, "Basic Investigation of Tool Wear," *J. Eng. Ind. Trans*, vol. 85, pp. 33-38, 1963.
- [20] G. List, G. Sutter, and X.F. Bi, "Investigation of tool wear in High Speed Machining by using a ballistic set-up," *Wear*, vol. 267, no. 9-10, pp. 1673-1679, 2009, doi:10.1016/j.wear.2009.06.018.
- [21] F. Ramírez Paredes, X. Soldani, J. Loya, and H. Miguélez, "A new approach for time-space wear modeling applied to machining tool wear," *Wear*, vol. 390-391, pp. 125-134, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.07.015.
- [22] E. Usui, T. Shirakashi, and M. Kitagawa, "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process, Part 3 Cutting Temperature and Crater Wear of Carbide Tool," *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, vol. 100, no. 2, pp. 236-243, 1978, doi: 10.1115/1.3439415.
- [23] P. Mathew, "Use of predicted cutting temperatures in determining tool performance," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 29, no. 4, pp. 481-497, 1989, doi: 10.1016/0890-6955(89)90066-7.
- [24] P.L.B. Oxley, *A Mechanics of Machining Approach to Assessing Machinability*, E. Horwood, Ed., Palgrave, London, UK: Ellis Horwood, Ltd, 1989.
- [25] T. Kitagawa, A. Kubo, and K. Maekawa, "Wear characteristics of various cutting tools in steel machining," in *Elastohydrodynamics-'96: Fundamentals and Applications in Lubrication and traction*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1997, pp. 569-578.
- [26] H. Zhao, G.C. Barber, and Q. Zou, "A study of flank wear in orthogonal cutting with internal cooling," *Wear*, vol. 253, no. 9-10, pp. 957-962, Nov. 2002, doi: 10.1016/S0043-1648(02)00248-X.
- [27] A. Molinari and M. Nouari, "Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting," *Wear*, vol. 252, no. 1-2, pp. 135-149, 2002, doi:10.1016/S0043-1648(01)00858-4.

- [28] Z. Pálmai, "Proposal for a new theoretical model of the cutting tool's flank wear," *Wear*, vol. 303, no. 1-2, pp. 437-445, 2013, doi: 10.1016/j.wear.2013.03.025.
- [29] A. Attanasio, E. Ceretti, S. Rizzuti, D. Umbrello, and F. Micari, "3D finite element analysis of tool wear in machining," *CIRP Annals*, vol. 57, no. 1, pp. 61-64, 2008, doi:10.1016/j.cirp.2008.03.123.
- [30] V.P. Astakhov, "Cutting tool wear, tool life and cutting tool physical resource," in *Tribology of Metal Cutting*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2007, ch. 4, pp. 220-275, doi: 10.1016/S0167-8922(06)80006-4.
- [31] A. Attanasio, E. Ceretti, and C. Giardini, "Analytical models for tool wear prediction during AISI 1045 turning operations," in *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO)*, vol. 8, 2013, pp. 218-223, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.092.