

Determinación del desgaste de la herramienta en operaciones de fresado periférico mediante las señales de emisión acústica

Ricardo Alzugaray-Franz^{1,2}, Eduardo Diez-Cifuentes¹, Erardo Leal-Muñoz¹, Mónica Villaverde-San José²,
Antonio Vizán-Idoipe²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile. Email: ricardo.alzugaray@ufrontera.cl

²Grupo de Ingeniería de Fabricación, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Madrid, España

Resumen

En la presente contribución, se presenta un método indirecto basado en la señal de emisión acústica para la estimación del desgaste progresivo de una herramienta de corte en operaciones de fresado periférico de acabado. Se considera la medición directa del desgaste de flanco y las fuerzas de corte con el propósito de establecer comparaciones que permitan evaluar el desempeño del método. Los resultados indican que la emisión acústica es sensible a los cambios en la condición de la herramienta y a la forma en que se desarrolla el perfil de desgaste. Lo anterior, refuerza los hallazgos existentes y adicionalmente provee evidencias experimentales que permiten avanzar en el establecimiento de criterios de inutilidad basados en las variables del proceso.

Palabras clave: desgaste de la herramienta, emisión acústica, fuerzas de corte, fresado periférico.

Abstract

In this work, an indirect approach based on the acoustic emission signal is presented to predict progressive tool wear in peripheral milling operations. Measurements of flank wear and cutting forces are considered in order to assess the performance of the method. The acoustic emission is found to be sensitive to changes of tool condition and the evolution of the wear land. The latter provides experimental evidence to support the current knowledge on tool wear estimation towards the definition of tool-life criteria based on indirect process variables.

Keywords: tool wear, acoustic emission, cutting forces, peripheral milling.

1. Introducción

El desgaste es un fenómeno progresivo de degradación de la herramienta de corte y que tiene efectos negativos en la productividad, eficiencia y seguridad de las operaciones de mecanizado. Aunque los mecanismos de desgastes son diversos, en fresado se trabaja comúnmente con el desgaste de flanco, el cual es consecuencia del rozamiento entre el plano de incidencia de la herramienta y la superficie recién mecanizada. La estimación del desgaste se puede hacer en forma directa a través de la medición de parámetros geométricos en la franja de desgaste desarrollada a lo largo de la parte activa del filo [1], o bien a través de la

medición de variables indirectas portadoras de información del desarrollo del proceso [2, 3].

Entre las variables indirectas, la emisión acústica es una magnitud muy utilizada en la caracterización de operaciones de mecanizado [4–7]. Tiene la ventaja de ser una tecnología poco invasiva, que no requiere de mayores modificaciones de la zona de trabajo de la máquina, que puede ser registrada sin interrumpir las operaciones y cuyo rango de frecuencia se encuentra por sobre las vibraciones producidas por la máquina u otras fuentes cercanas. Su relación con el desgaste de la herramienta ha sido analizada en forma intensiva [8–12], sin embargo, sigue sin dar lugar a un método de

monitorización concluyente y sus desarrollos todavía distan de poder ser implementados en la práctica.

En la presente contribución, se presenta un método indirecto basado en la señal de emisión acústica para la estimación del desgaste progresivo de una herramienta de corte en operaciones de fresado periférico de acabado. Se considera la medición directa del desgaste de flanco y las fuerzas de corte con el propósito de establecer comparaciones que permitan evaluar la sensibilidad de las variables respecto de los cambios en el estado de la herramienta y establecer evidencias para la predicción de su vida útil.

2. Metodología

La metodología utilizada en este trabajo se puede resumir en cuatro etapas: el diseño del experimento, desarrollo del aparato experimental, protocolo de realización de los ensayos, y análisis y procesamiento de los datos.

2.1. Diseño del experimento

Debido a la relación de causalidad que existe entre la velocidad de corte y el desgaste de la herramienta, se propone el diseño de un experimento de un factor y dos niveles. La Tabla 1 resume los detalles del diseño, el cual incorpora la ejecución de cuatro réplicas para cada uno de los tratamientos, con el propósito de mejorar la precisión de las observaciones. Esto da lugar a un total de 8 ensayos experimentales, las cuales fueron aleatorizadas para minimizar la ocurrencia de errores sistemáticos.

Tabla 1. Diseño del experimento.

Tratamiento (Réplicas)	Vc [m/min] (RPM [min ⁻¹])	a _p [mm]	a _e [mm]	f _z [mm/filo]
T1 (4)	33,93 (1200)	8	0,2	0,1
T2 (4)	84,82 (3000)			
Herramienta Diámetro, D = 9 [mm] Número de filos, Z = 2 (*) Ángulo de hélice, λ _s = 30° Material: HSS				
Pieza de trabajo Material: Acero AISI 4340 Longitud de corte: Lc = 90 [mm]				

(*) Se elimina uno de los filos antes de iniciar el tratamiento.

Cada tratamiento, consiste en la realización de una serie de pasadas consecutivas de fresado periférico en concordancia (y en seco) sobre una pieza prismática de acero AISI 4340. Esto significa que los tratamientos comienzan con una herramienta nueva y terminan una vez que se ha alcanzado un nivel preestablecido de desgaste en el filo primario. Todo esto manteniendo constantes las condiciones de operación.

Las herramientas de corte utilizadas en ambos tratamientos corresponden a fresas enterizas helicoidales de dos filos. Para evitar el efecto del alabeo, se elimina uno de los filos de la herramienta, lo que asegura que las observaciones de la progresión del desgaste conservan una carga de viruta constante.

2.2. Aparato experimental

El desarrollo experimental propuesto anteriormente se realiza en un centro de mecanizado Deckel Maho DMC 1035 V Eco. La Figura 1 muestra el detalle del montaje de los sensores que permiten la medición de la respuesta de las variables directas e indirectas del proceso.

La medición directa del desgaste de la herramienta se realiza por medio de un microscopio digital Dinolite Modelo AM4815ZTL, y su evaluación se basa en las recomendaciones de la norma ISO 8688-2 [1]. Estas mediciones se hacen a intervalos de tiempo constantes, dentro de la zona de trabajo de la máquina y sin necesidad de desmontar la herramienta. En cada inspección, se realiza un mapeo completo del filo, lo que permite caracterizar la forma en que evoluciona el perfil de la franja de desgaste a lo largo de la zona activa del filo.

Por otro lado, la respuesta de las variables indirectas se resume en la medición de la emisión acústica y las fuerzas de corte, las cuales son magnitudes físicas portadoras de información relevante del desarrollo del proceso.

La emisión acústica se mide por medio de un transductor piezoeléctrico Kistler 8152C0050500 y su unidad acondicionadora Kistler 5125C. Este transductor se monta de manera solidaria a la placa de sujeción de la pieza de trabajo, lo que asegura la existencia de una ruta de transmisión directa entre el transductor y la fuente de excitaciones. Este sistema proporciona una salida analógica correspondiente a la señal de emisión acústica (señal AE) que se extiende en el rango de 50 y 400 kHz.

La medición de las fuerzas de corte se realizó con una plataforma dinamométrica Kistler 9257BA la cual se monta rígidamente entre la mesa de trabajo de la máquina y la placa de sujeción de la pieza que está

siendo mecanizada. El dinamómetro se encuentra conectado a una unidad de control Kistler 5233A1, que tiene la función de acondicionar y entregar como salida tres señales analógicas en un rango de frecuencia comprendido entre 200 y 2000 Hz, correspondientes a las fuerzas en tres ejes mutuamente ortogonales.

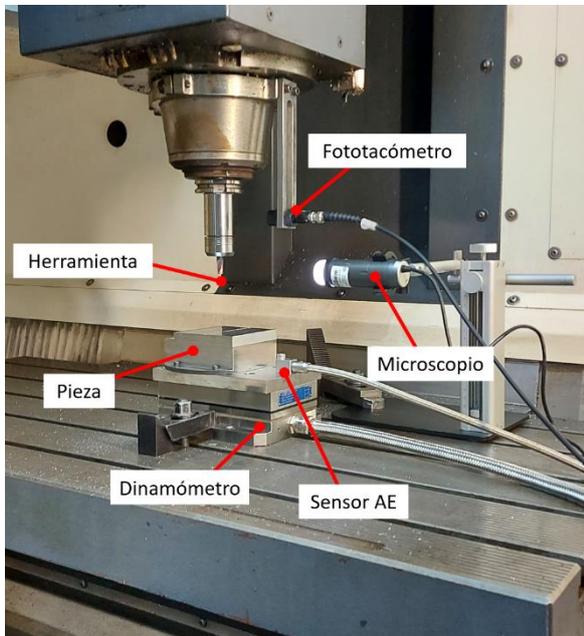


Figura 1. Componentes del aparato experimental.

Además, se incorpora la medición de la velocidad angular del husillo a través de un tacómetro láser LaserTach. Este sensor entrega un pulso analógico por cada revolución de la herramienta y se utiliza como referencia de tiempo en la etapa de procesamiento de datos.

Debido a las diferencias en la naturaleza dinámica de las señales del proceso, la adquisición de datos se realiza con una plataforma NI PXIe-1062Q equipada con las tarjetas NI PXI-6132 y NI PXI-4472B, dedicadas para la adquisición de las señales de alta y baja frecuencia, respectivamente. Este sistema se configura para la gestión simultánea y sincrónica de ambos dispositivos, los que trabajan con tasas de muestreo diferentes pero que mantienen una base de tiempo común. En este esquema de sincronización, la tarjeta NI PXI-6132 se define como dispositivo maestro. Tiene la función de generar la instrucción de inicio de la rutina de adquisición por medio de una señal de disparo que es compartida con el dispositivo secundario. Respecto del registro de los datos, la tarjeta NI PXI-6132 se ocupa de medir la señal de emisión acústica y el pulso de referencia con una frecuencia de muestreo de 2 [MHz], mientras que la tarjeta NI PXI-4472B realiza la medición de las tres componentes de

las fuerzas de corte y el pulso de referencia con una frecuencia de muestreo de 20 [kHz].

2.3. Protocolo de realización de los ensayos

Como parte de la metodología, se desarrolla un protocolo de realización de los ensayos de manera de uniformar las tareas realizadas y asegurar la calidad de los resultados obtenidos.

Antes de iniciar el experimento, se realiza el montaje de la pieza de trabajo sobre una placa de anclaje que permite una unión rígida con el dinamómetro y la mesa de la máquina, y que además asegura un punto de sujeción para el transductor de emisión acústica. Una vez montada la probeta, se realiza un planeado de su cara superior para asegurar que la profundidad de corte axial sea consistente en todos los tratamientos. Posterior a la preparación de la pieza, se procede a la instalación de los sensores dentro de la zona de trabajo del centro de mecanizado. Se realizan las conexiones entre los transductores y sus respectivas unidades de acondicionamiento, alimentación de energía y el sistema de adquisición de datos. Finalmente, se hace la preparación de las herramientas de corte, donde se elimina uno de los filos. La correcta eliminación del filo se verifica al inicio de cada tratamiento, inmediatamente después de la primera pasada. Se revisa que la forma de onda de la señal de emisión acústica y las fuerzas presenten un único evento de corte por cada revolución de la herramienta.

Antes de iniciar cada tratamiento, se realiza el escuadre de la probeta en las caras paralelas a la dirección de avance. Esto asegura la calidad inicial de la superficie a mecanizar y garantiza el correcto control dimensional de la probeta después de cada pasada. Otra medida necesaria es el ajuste de la sensibilidad y ganancia de las unidades de control de los transductores con el objetivo de evitar sobrecargas en los equipos.

En cada tratamiento, se realizan una serie pasadas de corte consecutivas sobre la pieza de trabajo. Durante cada pasada, se registran las variables del proceso hasta alcanzar un nivel preestablecido de desgaste en el filo primario. Después de cada pasada, la pieza es sometida a un control dimensional por medio de un tornillo micrométrico para verificar que el ancho de corte real se ajuste al valor comandado. Por otro lado, se realiza la inspección de la herramienta por medio del microscopio digital. En este control se realiza el mapeo completo del flanco del filo primario, verificando que la evolución del desgaste sea progresiva y sin la ocurrencia de fallas localizadas. Después de la inspección de la herramienta, y antes de iniciar un nuevo ciclo de corte, se realiza una pasada sobre la superficie recién mecanizada para la reconstrucción de

la superficie de referencia y se realiza la previsualización de los datos registrados para verificar la integridad de la información y detectar la ocurrencia de algún fallo.

2.4. Procesamiento y análisis de datos

El análisis del desgaste consiste en el procesamiento de las imágenes obtenidas durante las inspecciones de la herramienta. Para esto se realiza un mapeo completo del filo activo y se establece el seguimiento de los valores instantáneos descritos a continuación y cuya representación gráfica se indica en la Figura 2,

- VB_{medio} , definido como el ancho medio de la franja de desgaste. Se considera como un parámetro representativo del comportamiento uniforme del perfil.
- VB_{max} , definido como el ancho máximo de la franja de desgaste. Se considera como un parámetro representativo del crecimiento localizado del perfil.

La medición del ancho instantáneo medio y máximo del perfil de desgaste se hace previa calibración del microscopio para el nivel de magnificación utilizado en los ensayos (140X).

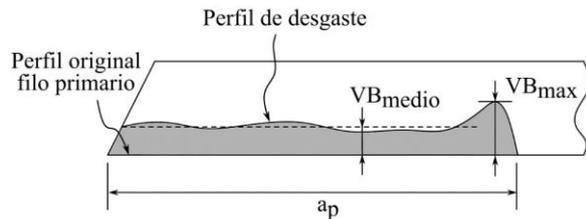


Figura 2. Esquema del perfil de desgaste y parámetros geométricos de medición en el flanco del filo primario de la herramienta.

En el caso de las variables de respuesta indirectas, el procesamiento de datos requiere de una etapa de preparación de las señales y que consiste principalmente en la aplicación de factores de sensibilidad, ajuste del decalaje y recorte de las señales dentro de la zona de corte estacionaria, lo que asegura que el análisis se realiza con condiciones de corte constantes.

Una vez preprocesadas las señales, se procede con el cálculo de los siguientes valores globales: valor cuadrático medio (RMS) y valor pico. Estos parámetros estadísticos se calculan por cada revolución de la herramienta y son seleccionados para cuantificar el contenido energético y prominencia de las señales. Posteriormente, se calcula el promedio móvil de ambos

valores globales y su respectiva desviación estándar para el periodo que tarda la herramienta en recorrer la zona de corte estacionaria, y que corresponde a 38 y 16 segundos para el primer y segundo tratamiento respectivamente.

La etapa de análisis consiste en estudiar la tendencia de los valores globales de la señal de emisión acústica y las fuerzas de corte (F_{xy} y F_z) con el objetivo determinar si estas magnitudes son adecuadas para la estimación del desgaste y establecer evidencias que permitan definir un criterio de inutilidad de la herramienta.

3. Resultados

3.1. Curvas de desgaste de flanco (VB)

A partir del procesamiento de las imágenes obtenidas con el microscopio, se realiza la caracterización del perfil de desgaste en función del tiempo efectivo de corte. En ambos tratamientos, se confirma el desarrollo progresivo de la franja de desgaste, sin la ocurrencia de fallas localizadas como astillamientos o roturas.

La Figura 3 muestra las curvas de desgaste para ambos tratamientos a partir de la evolución de los parámetros VB_{medio} y VB_{max} . Se utiliza como criterio de inutilidad el instante en que el desgaste de flanco alcanza valores cercanos al umbral de 0,3 [mm], por lo que se desprende que la vida útil de la herramienta en el primer tratamiento es de 900 [s], mientras que para el segundo se reduce a 360 [s].

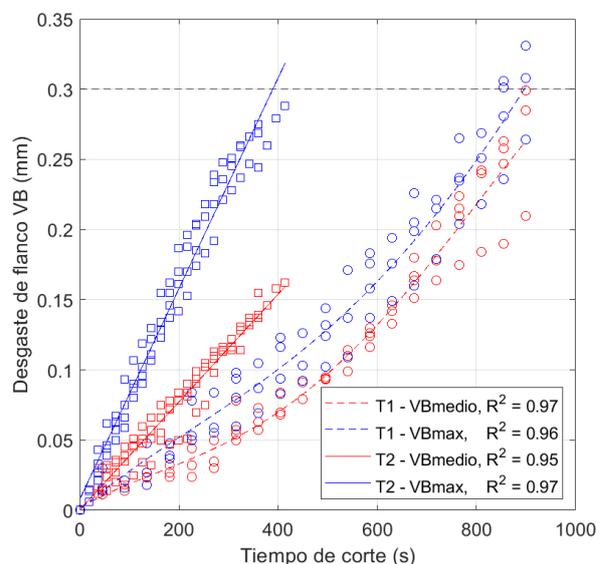


Figura 3. Curvas del desgaste de flanco del filo primario. La línea segmentada horizontal indica el umbral del criterio de inutilidad de la herramienta utilizado como referencia en los ensayos.

Los resultados confirman que el aumento de la velocidad de corte no sólo reduce la vida útil de la herramienta, sino que afecta también la forma que evoluciona su perfil. A mayor velocidad de corte, se observa una tasa de desgaste más acelerada, lo cual incide en un desarrollo de un perfil menos uniforme. Esto se expresa en una mayor diferencia entre las curvas de VB_{medio} y VB_{max} y se comprueba gráficamente con la Figura 4. Si se comparan los perfiles de desgaste de la herramienta al término de cada tratamiento, se tiene que la franja de desgaste del primer tratamiento presenta un comportamiento mayormente uniforme, lo que difiere con lo observado en el segundo tratamiento, donde se aprecia un aumento localizado en el límite donde termina la parte activa del filo.

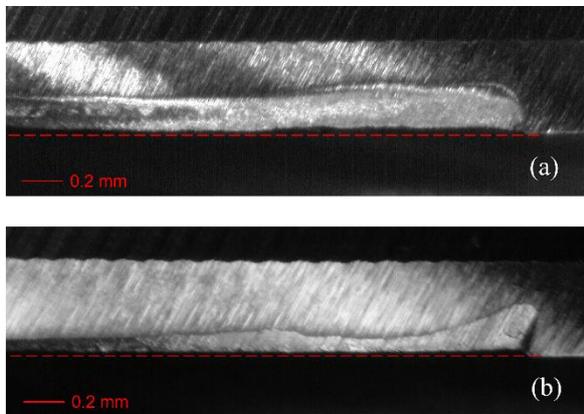


Figura 4. Perfil de desgaste de flanco del filo primario en la zona más alejada de la punta de la herramienta. (a) Tratamiento 1 con un tiempo de corte de 900 [s]. (b) Tratamiento 2 con un tiempo de corte de 360 [s]. La línea segmentada indica el perfil original del filo de la herramienta.

3.2. Patrón característico de las variables del proceso

En la Figura 5 se muestra la evolución de las señales del proceso durante una pasada completa de la herramienta a lo largo de la longitud de corte de la pieza. En todos los casos, e independiente de los patrones característicos de cada magnitud, se aprecian tres zonas de corte claramente definidas en términos de su amplitud. En la zona inicial y final de cada pasada, se presenta un estado transitorio de amplitud variable debido a los cambios que experimenta el empuje de la herramienta durante la entrada y salida de la pieza. Por otro lado, en la parte central se encuentra la zona estacionaria, la que exhibe amplitudes regulares como consecuencia que las condiciones de corte se mantienen constantes.

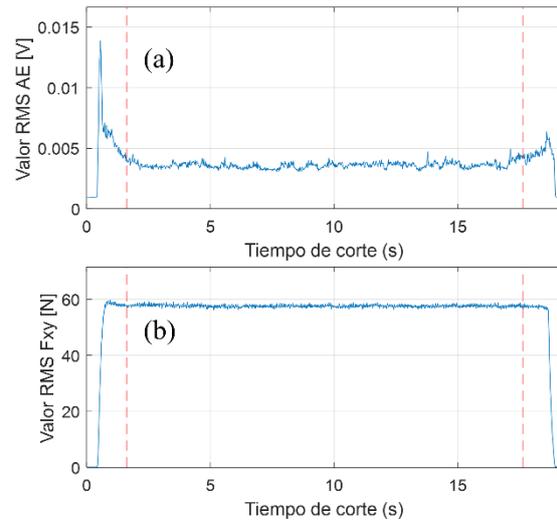


Figura 5. Patrón característico del valor RMS para una pasada de la herramienta a lo largo de la longitud de corte de la pieza. (a) Señal AE y (b) fuerza de corte F_{xy} . Las líneas segmentadas indican los puntos de transición entre las zonas transitorias y la zona estacionaria.

3.3. Tendencia de los valores globales

La Figura 6 muestra las curvas de tendencia del valor RMS y el valor pico para las señales de interés. En todos los casos, se aprecia un aumento de amplitud con respecto al tiempo de corte, lo que confirma que la emisión acústica y las fuerzas de corte son indicadores válidos para hacer el seguimiento de la progresión del desgaste de la herramienta.

Si se compara la evolución del valor RMS y el valor pico para una misma variable, se observa un comportamiento muy similar, lo que implica que ambos valores globales son igualmente sensibles a los cambios en el estado de la herramienta.

A partir de los datos experimentales, se ajustan curvas de tendencia utilizando un modelo potencial ($y = ax^b + c$). Aunque todas las variables exhiben respuestas diferentes, las tasas de cambio de las fuerzas de corte F_{xy} y F_z no son capaces de distinguir el comportamiento de las curvas de desgaste (VB) mostrado en la Figura 3. Esta característica representa el potencial que tiene la emisión acústica para detectar la forma en que se desarrolla el perfil de desgaste.

La Figura 7 muestra la desviación estándar del valor pico de las señales de interés. En todos los casos, las tendencias están ajustadas a un modelo potencial, cuyos resultados sugieren que a mayor tiempo de corte,

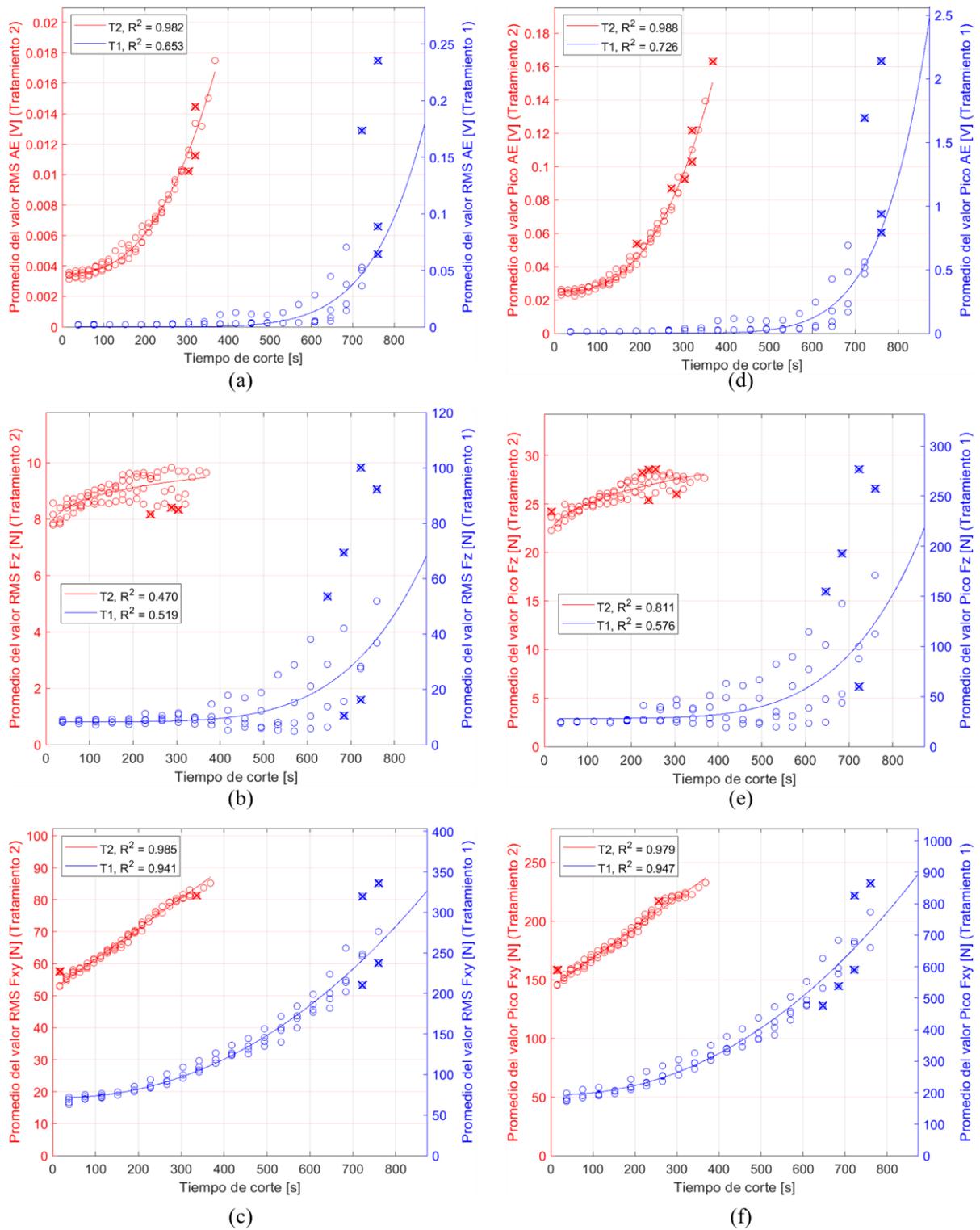


Figura 6. Curvas de tendencia de los valores globales promedio. (a) Valor RMS señal AE, (b) valor RMS fuerza F_z , (c) valor RMS fuerza F_{xy} , (d) valor pico señal AE, (e) valor pico fuerza F_z , (f) valor pico fuerza F_{xy} . Se marcan con una X los valores atípicos que se encuentran fuera del modelo.

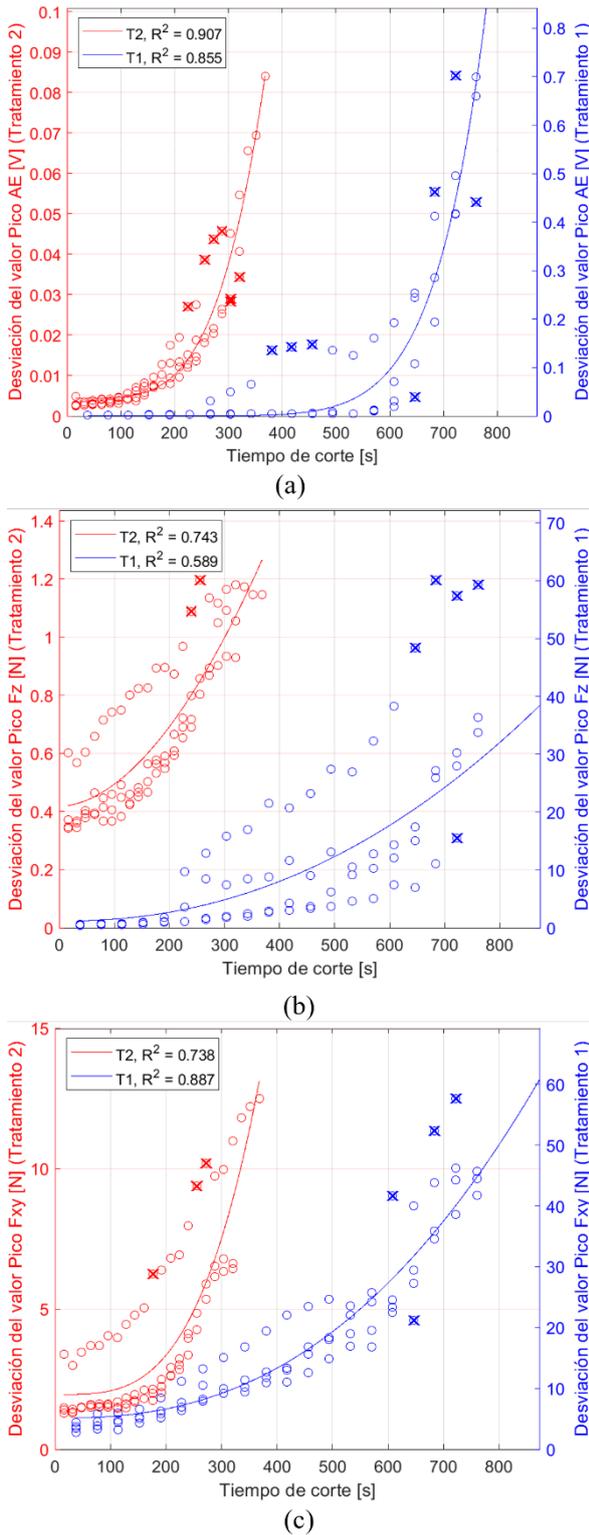


Figura 7. Curvas de tendencia de la desviación estándar de los valores globales promedio. (a) Valor pico señal AE, (b) valor pico fuerza F_z , (c) valor pico fuerza F_{xy} . Se marcan con una X los valores atípicos que se encuentran fuera del modelo.

mayor es la dispersión de los datos. Físicamente, esto quiere decir que una herramienta en buenas condiciones tiende a generar ciclos de corte de amplitud uniforme, mientras que una herramienta en un estado de degradación comienza a acumular ciclos de corte cuya amplitud se aleja cada vez más del valor medio. Si se compara la evolución de las curvas de tendencia respecto de aquellas del valor global promedio, se tiene que la emisión acústica mantiene las características mostradas en el análisis anterior, sin embargo, la tendencia de las fuerzas de corte F_{xy} y F_z interpreta de mejor manera el comportamiento de las curvas de desgaste. Esto posiciona a la desviación estándar de los valores globales como un indicador complementario para la estimación la condición de la herramienta de corte.

3.4. Evidencias para la definición de un criterio de inutilidad basado en las variables del proceso

A pesar de que las curvas de tendencia analizadas previamente son indicadores de la progresión del desgaste de la herramienta, la definición de un criterio de inutilidad basado en las variables del proceso mantiene el requisito de establecer un umbral de amplitud que ponga límite a la vida útil de la herramienta.

En este sentido, el análisis de la forma de onda de los valores globales permite incorporar información complementaria a lo discutido anteriormente y que permite robustecer el proceso de decisión. La Figura 8 muestra un gráfico en cascada del valor pico de la señal de emisión acústica en función del tiempo de corte estacionario y el número de pasada del tratamiento. Si se realiza el seguimiento de los cambios de amplitud de la forma de onda respecto a pasadas previas, se puede inferir que la herramienta comienza a desgastarse en forma acelerada a partir de la pasada 11, lo que es equivalente aproximadamente a un 46% del tiempo de vida dado por el umbral $VB = 0,3$ [mm]. Aunque lo anterior podría considerarse como un criterio cualitativo de estimación, ofrece la posibilidad de aplicar otros métodos estadísticos que permitan extraer características cuantificables para la estimación del tiempo de vida útil de la herramienta.

4. Conclusiones

En este trabajo se analiza la determinación indirecta del desgaste de una herramienta de corte en operaciones de fresado periférico de acabado realizadas en condiciones de operación constantes. Lo anterior, se obtiene en función del seguimiento de variables del proceso como la emisión acústica y las fuerzas de corte. De los resultados de los ensayos, se confirma que la velocidad de corte afecta no sólo la vida útil de la

herramienta, sino que también la forma que evoluciona el perfil de desgaste. Además, se presentan evidencias experimentales que permiten avanzar en la definición de un criterio de inutilidad basado en variables indirectas del proceso

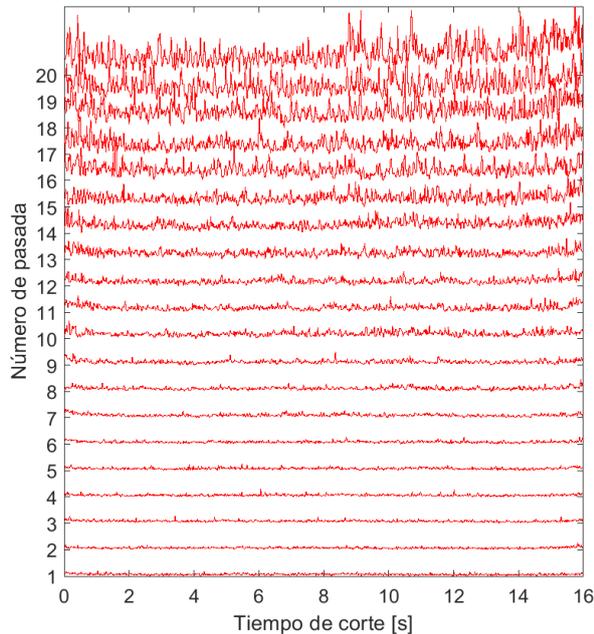


Figura 8. Gráfico en cascada del valor pico de la señal AE para el Tratamiento 2.

5. Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Dirección de Cooperación Internacional de la Universidad de La Frontera, por el financiamiento otorgado para la divulgación de esta investigación. Adicionalmente, se agradece al personal del Laboratorio de Fabricación del Departamento de Ingeniería Mecánica UFRO, en particular al Sr. Robert Jaque por su ayuda en la operación del centro de mecanizado.

6. Referencias

- [1] ISO 8688, *Tool life testing in milling — Part 2: End milling*. International Standardization Organization (ISO), 1989.
- [2] Wong SY, Chuah JH, Yap HJ. Technical data-driven tool condition monitoring challenges for CNC milling: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 2020; 107: 4837–4857.
- [3] Li X, Liu X, Yue C, et al. Systematic review on tool breakage monitoring techniques in machining operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2022; 176: 103882.
- [4] Blum T, Inasaki I. A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. *Journal of Engineering for Industry* 1990; 112: 203–211.
- [5] Byrne G, Dornfeld D, Inasaki I, et al. Tool Condition Monitoring (TCM) — The Status of Research and Industrial Application. *CIRP Annals* 1995; 44: 541–567.
- [6] Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G, et al. Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals* 2010; 59: 717–739.
- [7] Kishawy HA, Hegab H, Umer U, et al. Application of acoustic emissions in machining processes: analysis and critical review. *Int J Adv Manuf Technol* 2018; 98: 1391–1407.
- [8] Diei EN, Dornfeld DA. Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Face Milling. *Journal of Engineering for Industry* 1987; 109: 234–240.
- [9] Dornfeld D. Application of acoustic emission techniques in manufacturing. *NDT & E International* 1992; 25: 259–269.
- [10] Diniz AE, Liu JJ, Dornfeld DA. Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning. *Wear* 1992; 152: 395–407.
- [11] Kakade S, Vijayaraghavan L, Krishnamurthy R. In-process tool wear and chip-form monitoring in face milling operation using acoustic emission. *Journal of Materials Processing Technology* 1994; 44: 207–214.
- [12] Hase A, Wada M, Koga T, et al. The relationship between acoustic emission signals and cutting phenomena in turning process. *Int J Adv Manuf Technol* 2014; 70: 947–955.