

Influencia de los regímenes de lubricación en la vida de la herramienta y el acabado superficial del fresado de aceros endurecidos AISI D2 y AISI D6

Maritza Mariño-Cala
Yanier Sánchez-Hechavarría

Resumen

Se realizó un análisis de la calidad superficial y la vida de la herramienta durante el mecanizado con altas velocidades de los aceros endurecidos AISI D2 y AISI D6, en dos regímenes de lubricación. Los ensayos fueron realizados en un centro de mecanizado MORI SEIKI SV 40 y se emplearon herramientas intercambiables de metal duro recubiertas. La evaluación de la calidad superficial se realizó mediante el monitoreo *off-line* de la rugosidad superficial media *Ra* en el sentido del avance y perpendicular a este. La progresión del desgaste en las herramientas se analizó a través de un estereoscopio montado en conjunto con una cámara fotográfica digital interconectada a un programa analizador de imágenes. La aplicación de corte seco en operaciones de fresado de aceros endurecidos con altas velocidades apunta hacia una disminución de los costos del proceso asociados al uso de líquidos lubricantes y su reciclaje y a un aumento de la calidad superficial de la pieza y la vida de la herramienta.

Palabras clave: fresado; lubricación; rugosidad; desgaste; corte seco.

Influence of lubrication regimes in tool life and surface finish of milling hardened steels AISI D2 and AISI D6

Abstract

The influence of lubrication regimes in tool life and surface finish during milling tooling steel AISI D2 and AISI D6 is performed. An analysis of the surface quality and the tool life during machining with high speeds of these steels in two regimes of lubrication is done. The tests were performed in a machining center MORI SEIKI SV 40 and interchangeable coated carbide tools were used. The surface quality evaluation was conducted by off-line monitoring of the surface roughness average Ra in the feed direction and perpendicular to this. The progression of the tool wear was analyzed through a stereoscope mounted in conjunction with a digital camera interfaced to an image analyzer program. Applying dry milling cutting hardened steels at high speeds, points towards a reduction of process costs associated with the use and recycling liquid lubricants and increased surface quality of the workpiece and the tool life

Keywords: milling; lubrication; roughness; wear; dry cut.

1. INTRODUCCIÓN

El uso del fresado con altas velocidades de aceros endurecidos empleados en la fabricación de moldes y matrices ha disminuido el tiempo de fabricación de estos elementos y eliminado del proceso operaciones con alto consumo de energía y de tiempo de fabricación como la electroerosión por penetración. Uno de los puntos críticos de fresado con altas velocidades son las altas temperaturas de corte y el elevado consumo de herramientas, por lo que el uso de fluidos de corte, principalmente para lubricar el proceso, está muy extendido (Fallböhmer *et al.* 2000; Gomes 2001).

En los trabajos de Rahman, Kumar & Salam (2002), Bruni *et al.* (2008), Tosun & Pihtili (2010) se pueden encontrar las condiciones de corte empleadas para los diferentes tipos de herramientas y procesos. Sin embargo, las condiciones de mecanizado empleadas durante las operaciones de mecanizado con altas velocidades (MAV) no se encuentran fácilmente en la literatura y los valores obtenidos en el mecanizado convencional no pueden ser extrapolados para operaciones de MAV. Los fenómenos en la interfase herramienta-viruta y herramienta-pieza son diferentes y muchas veces contrarios a la intuición (Davies, Burns & Schmitz 2001).

En la actualidad se han intensificado los trabajos de investigación con el objetivo de disminuir al máximo o eliminar el uso de fluidos de corte, tanto los refrigerantes como los lubricantes. Los factores importantes que justifican estos estudios incluyen la disminución de los costos de producción, los problemas ecológicos y las exigencias legales referidas a la protección del medio ambiente y de la salud humana.

Los líquidos de corte representan el 16 % de los costos de mecanizado y deben ser cambiados periódicamente como resultado de la degradación por acción bacteriana, oxidación o contaminación con sustancias provenientes del medio y del mecanizado, por lo que su eliminación del proceso representa la disminución de una parte importante de los costos, al suprimirse un producto de importación con un alto valor en el mercado internacional. Se calcula que en el mundo actualmente se consumen 9 300 000 t de líquidos refrigerantes con gran poder contaminante; de estos, 3 500 000 t de aceite soluble (5 % de aceite en emulsión) producen 70 000 000 t de agua contaminada que debe ser reciclada. En Alemania, en el año 2002, el volumen de desechos de líquidos refrigerantes utilizados en la industria metalmeccánica representó el 60 % del consumo de los líquidos de corte, con un equivalente a 1 151 132 t y

un costo relativo muy superior al de herramental de corte (Sánchez-Hechavarría 2008).

Por razones de diferente índole se aconseja la eliminación, o la reducción, del uso de los fluidos de corte. En primer lugar, por razones económicas, dado que reducir al máximo los costos del ciclo de vida de los fluidos de corte tiene una repercusión directa en los costos de fabricación. En segundo lugar, por motivaciones medioambientales, ya que el no uso de lubricantes redundaría en una menor contaminación. A estos aspectos se suma que en los países industrializados se están desarrollando estrictas legislaciones sobre el uso de fluidos de corte (Sánchez-Hechavarría 2008).

La aplicación de fluidos de corte en los procesos de mecanizado, además de lubricar y refrigerar la zona de corte, tiene como objetivo remover con facilidad la viruta de la cavidad que se está mecanizando. Sin embargo, en procesos de mecanizado interrumpido, la utilización de fluidos acuosos, de alta capacidad de refrigeración, causa una reducción de la vida de la herramienta por incentivar grietas de origen térmico, debido a la mayor fluctuación cíclica de la temperatura (Vieira, Machado & Ezugwu 2001).

En MAV el tiempo de contacto entre la herramienta y la viruta es tan corto debido a la alta velocidad, que la transferencia de calor a la fresa es pequeña, reduciéndose la necesidad de disponer de un sistema de lubricación. Todavía, el desarrollo de los recubrimientos favorece el mecanizado en seco o en condiciones MQL (*Minimal Quantity Lubricant*), donde son habituales caudales de entre 0,01 l/min a 0,5 l/min, que incluso disminuyen los riesgos de salud e impacto ambiental. Lo aconsejable en MAV es aplicar aire comprimido para evitar el re-corte de las virutas endurecidas dentro de las cavidades (Sivak, Martínez & Maceira 2002).

La aplicación de MQL y el corte seco promueven una reducción o eliminación de los líquidos refrigerantes en los procesos de fresado con altas velocidades (*HSM*). Con estas dos técnicas se ha obtenido un aumento en la vida de la herramienta y en la rugosidad superficial de la pieza mecanizada.

La técnica de MQL se aplica al fresado *HSM* con el objetivo de aumentar la capacidad de lubricación, fundamentalmente en las operaciones de desbaste y semiacabado, donde se usan pequeñas cantidades de lubricantes, este es pulverizado en forma de niebla junto con el aire comprimido. La aplicación de MQL tiene poca capacidad de refrigeración y

el objetivo de su utilización es conseguir una pequeña lubricación en la zona de corte y minimizar el efecto de la fluctuación de la temperatura en la herramienta.

Los efectos de la utilización de la técnica MQL en el fresado *HSM*, de aceros herramientales endurecidos, son fuertemente influenciados por una serie de factores. Entre estos podemos citar los parámetros de mecanizado, el material a mecanizar, presión de salida del flujo, distancia de aplicación, geometría mecanizada y material de la herramienta (Diniz, Marcondes & Coppini 2010).

Rahman, Kumar & Salam (2002) realizaron ensayos de fresado de piezas de acero herramientales ASSAB 718 HH (composición similar al AISI P20) con 35 HRC de dureza aplicando MQL y corte seco. Para estos ensayos utilizaron herramientas de metal duro sin recubrimientos y velocidades de corte de 125 m/min. Los resultados obtenidos muestran que la vida de la herramienta no tuvo variación significativa entre la aplicación de MQL y corte seco.

Rael & Diniz (2004) ensayaron el uso de MQL en el fresado HSM de matrices de acero endurecido ABNT H13 (composición similar al AISI H13), con una dureza de 52 HRC, con herramientas enterizas de metal duro con recubrimiento de TiAlN y velocidad de corte de 200 m/min. Los resultados mostraron que con la aplicación de MQL la vida creció el doble, con respecto a la obtenida con el corte seco, y durante el mecanizado seco esta superó dos veces la obtenida con la aplicación de fluido de corte en abundancia. Resultados similares obtuvieron Braghini, Diniz & Teixeira (2009) durante el fresado de acero inoxidable austenítico 15-5 PH (endurecido por precipitación) con fresas de pastillas de metal duro con recubrimiento TiAlN.

Su *et al.* (2007) mostraron que durante el fresado frontal del acero herramientales AISI D2 con 62 HRC de dureza, utilizando herramientas de metal duro y velocidades de corte de 175 m/min, la vida de la herramienta puede ser incrementada en un 106 %, con la utilización de la técnica de MQL, con respecto al corte lubricado.

De Oliveira (2007) realizó ensayos de fresado de superficies inclinadas ($\alpha = 75^\circ$) de acero endurecido ABNT H13 (52 HRC), con velocidades de corte de 300 m/min ($n = 10\,778$ rpm), verificando que la vida de la herramienta con el corte seco fue 29,4 % mejor que cuando se mecanizó con aceite integral base vegetal Fin Lube AL con aditivo de Teflón y 37,2 mejor que cuando se utilizó aceite integral Vascomill 42.

La aplicación de MQL en los procesos de corte tiene como inconveniente el vapor, la niebla o el humo del aceite que se forma en la zona de corte debido a las altas temperaturas inherentes al proceso y a la pulverización del aceite. Estas son formas de contaminación indeseables que en algunos casos hacen inviable su aplicación en el sector industrial por lo que se ha optado por la segunda variante, el corte seco (Diniz, Marcondes & Coppini 2010).

Además, en las aplicaciones MQL se debe tener en cuenta que, aunque se empleen bajos niveles de flujos de refrigerante (< 50 ml/h), el consumo de fluido de corte debe ser considerado y calculado minuciosamente.

Para que no ocurra una reducción drástica de la vida de la herramienta o de la calidad superficial de la pieza durante el corte seco es fundamental que se tengan materiales herramentales y condiciones de corte adecuadas. Para el fresado de aceros endurecidos se emplean generalmente herramientas de metal duro recubiertas con capas de TiCN, TiAlN y TiAl y algunas calidades de cermets. La optimización de los regímenes de corte (aumento del avance y disminución de la velocidad) y los estudios de estabilidad dinámica del proceso de fresado HSM contribuyen a la extensión de la aplicación del corte seco de aceros (Diniz, Marcondes & Coppini 2010).

Otra solución para la remoción de la viruta de la zona de corte durante el proceso de fresado con altas velocidades de aceros endurecidos es la aplicación de aire comprimido. Con la implementación de esta variante hay que considerar el alto nivel de ruido, generalmente por encima de los niveles permisibles para el oído humano (< 80 dB), que pueden afectar la salud del operario y la comunicación en el área de trabajo (Diniz, Marcondes & Coppini 2010).

El objetivo de esta investigación fue determinar la influencia de los regímenes de lubricación (mínimo lubricado y seco) en la vida de la herramienta de corte, la calidad superficial de la pieza y el impacto ambiental del proceso de fresado de aceros herramentales endurecidos utilizando altas velocidades de corte.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos fueron realizados en un centro de mecanizado vertical MORI SEIKI SV 40 con rotación máxima del husillo de 12 000 rev/min y potencia principal de 22 kW. Para la aplicación de MQL se utilizó una instalación MIST COOLANT EQUIPMENT, modelo OS-21-AT-40, de la empresa FUSO SEIKI. En esta instalación, el aire comprimido es el responsable de atomizar el aceite lubricante cerca del área de aplicación.

Se utilizaron dos tipos de aceites integrales de base vegetal: de la empresa BLASER SWISSLUBE el Vascomill 42 y de INFERFLON el Fin Lube AL. Este último contiene teflón como aditivo en su composición. El flujo utilizado fue de 12 mL/h y la presión de aplicación de 0,45 MPa.

Se fabricaron dos cuerpos de prueba con superficies inclinadas en rampa, con un ángulo de inclinación $\alpha = 45^\circ$. Los materiales seleccionados para la fabricación de los cuerpos de prueba fueron los aceros para herramientas AISI D2 y AISI D6 endurecidos, los cuales fueron escogidos debido a sus aplicaciones en la fabricación de moldes y matrices. A los cuerpos de prueba utilizados se le realizaron comprobaciones de dureza mediante el método Rockwell, en 10 puntos escogidos de forma aleatoria, obteniéndose valores de dureza media de 60,6 HRC \pm 1,14 HRC para el acero AISI D2 y 61,5 HRC \pm 1,1 HRC para el acero AISI D6. En la Tabla 1 se muestra la composición química de los aceros AISI D2 y AISI D6 utilizados en los ensayos.

Tabla 1. Composición química de los aceros AISI D2 y AISI D6

	C	Mn	P máx	S máx	Si	Cr	W	V	Mo	Fe
D2	1,5 2,0	---	0,03	0,03	0,2 0,3	11,0 12,0	---	0,90	0,95	Balance
D6	2,0 2,5	0,2 0,6	0,03	0,03	0,2 0,4	11,0 13,0	0,60 1,25	---	---	Balance

El análisis químico de los materiales fue realizado en un espectrómetro de absorción atómica AA 20 Plus de la marca VARIAN, utilizando las normas ASTM E 39-84, ASTM E 350-2012 y ASTM E 353-2014.

Para los ensayos se usaron fresas de espiga de punta esférica (ball nose) de 16 mm R216F-16 40 E-L, de la firma SANDVIK COROMANT. Las pastillas intercambiables son de la clase P10A (ISO H10) con recubrimiento multicapas TiAlN. Para el montaje de las pastillas se utilizaron portaherramientas de metal duro con extremo de acero de alta resistencia R216F-16A16C-063. El conjunto portaherramientas-herramienta fue fijado con una longitud de 70 mm. El proceso de corte se realizó en seco y con la técnica MQL. En la Tabla 2 se muestran las condiciones de corte que se emplearon durante las corridas experimentales.

Tabla 2. Condiciones experimentales

Velocidad de corte (m/min)	Cuerpos de prueba	Incremento axial (mm)	Incremento radial (mm)	Régimen de lubricación
360	AISI D2	0,30	0,20	MQL Corte seco
420	AISI D6	0,21	0,15	MQL Corte seco

Para el fresado de los cuerpos de prueba se seleccionó una estrategia de corte horizontal descendente a favor del avance, siguiendo las recomendaciones de Toh (2004); Pivetta (2005); Nicola, Zeilmann & Missel (2009) y Cosma (2011).

Los perfiles de rugosidad se analizaron utilizando un rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo SJ-201P, montado en un trazador de altura, lo que posibilita la inclinación del rugosímetro con relación a la superficie fresada. La adquisición del perfil de rugosidad se logró mediante el programa SJ-201Excel. En la Figura 1 se muestran las dos posiciones en las cuales se obtuvieron los perfiles de rugosidad.

La calidad superficial fue evaluada utilizando los parámetros de rugosidad media Ra en dos direcciones: transversal y longitudinal a la dirección del avance de la herramienta, con cut-off de 0,8 mm y una longitud de medición L igual a 5 mm. Para filtrar las señales se utilizó un filtro PC 50.



Figura 1. Obtención del perfil de rugosidad en sentido longitudinal y transversal a la dirección del avance de la herramienta con el rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201P.

Para la medición el desgaste de flanco de las herramientas (VBB) fue medido utilizando un microscopio estereoscópico marca QUIMIS, montado en conjunto con una cámara fotográfica de marca MOTICAM

1 000 de 1,3 MP, la cual está interconectada al programa analizador de imágenes MOTIC IMAGES PLUS 2,0 ML. Este sistema permite una lectura rápida y eficaz de los valores de desgaste, pues el monitoreo es realizado *off-line*. Durante los ensayos el desgaste de flanco fue medido a cada cien pasadas de la herramienta sobre la pieza.

Las pastillas intercambiables fueron preparadas y analizadas en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de la marca JEOL, modelo JXA-840A, equipado con sistema EDS (Espectroscopia de Energía Dispersiva). Este sistema posibilita analizar en detalles los mecanismos de desgaste y averías en los bordes cortantes e identificar, de forma semicuantitativa, la presencia de determinado material en diferentes puntos del borde cortante.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se muestra que la vida media de la herramienta durante el fresado en seco del cuerpo de prueba de acero AISI D2 fue de 61,7 min. Con la utilización de aceite integral Vascomill 42, mediante MQL, con un flujo de 12 ml/h y presión de 0,45 MPa, la vida media de la herramienta fue de 38,6 min y cuando se aplicó aceite integral Fin Lube AL, mediante MQL con el mismo flujo y presión de salida, la vida de la herramienta fue de 43,5 min.

Tabla 3. Vida de la herramienta para cada una de las condiciones de corte

	Réplica	Material	Condición de corte		
			Seco	MQL Vascomill 42	MQL Fin Lube AL
T (min)	1 ^{ra}	AISI D2	55,4	36,4	42,6
T (min)	2 ^{da}	AISI D2	56,8	37,7	41,9
T (min)	3 ^{ra}	AISI D2	55,7	36,9	42,4
T media (min)		AISI D2	56,0	37,0	42,3

Mediante los resultados obtenidos se comprobó que la reducción de la vida de la herramienta, con respecto al corte seco, fue de 33,9 % con la utilización del aceite Integral Vascomill 42 y de 24,5 % con la utilización del aceite Integral Fin Lube AL. Se evidenció también que no existe una diferencia notable en la vida de la herramienta si se comparan los resultados obtenidos con la aplicación de las dos clases de aceites. Estos resultados coinciden con los obtenidos por De Oliveira (2007).

Sin embargo, difieren de los obtenidos por Rahman, Kumar & Salam (2002), que utilizaron velocidades de rotación del husillo de 1990 rev/min, bastante bajas si las comparamos con las usadas en los ensayos realizados ($n = 7\ 710$ rev/min). Durante el fresado con altas velocidades de rotación del husillo se genera un flujo de aire por la rotación de la herramienta; este dificulta la penetración del líquido refrigerante en la zona de corte, por lo que en elevadas velocidades de rotación del husillo la eficiencia de la lubricación MQL es reducida; lo cual minimiza la capacidad del fluido de reducir el rozamiento en la interfase viruta-herramienta y las adhesiones en la arista de corte y propicia el surgimiento de las grietas de origen térmico.

En la Figura 2 se muestra el área mecanizada para la segunda réplica en las tres condiciones de corte utilizadas en los ensayos. Con el aumento de la vida de la herramienta se incrementa la productividad de la misma y disminuyen los costos asociados al consumo de herramental de corte, por lo que durante las operaciones de fresado de acero endurecidos con altas velocidades de corte los costos asociados a los fluidos de corte (16 % de los costos totales de maquinado) pueden ser eliminados cargando estos dispendios a los costos por herramental de corte que constituyen entre el 4 % y 5 % de los costos de maquinado, incluso en los casos donde la vida de la herramienta es mejor durante el corte con técnicas de MQL.

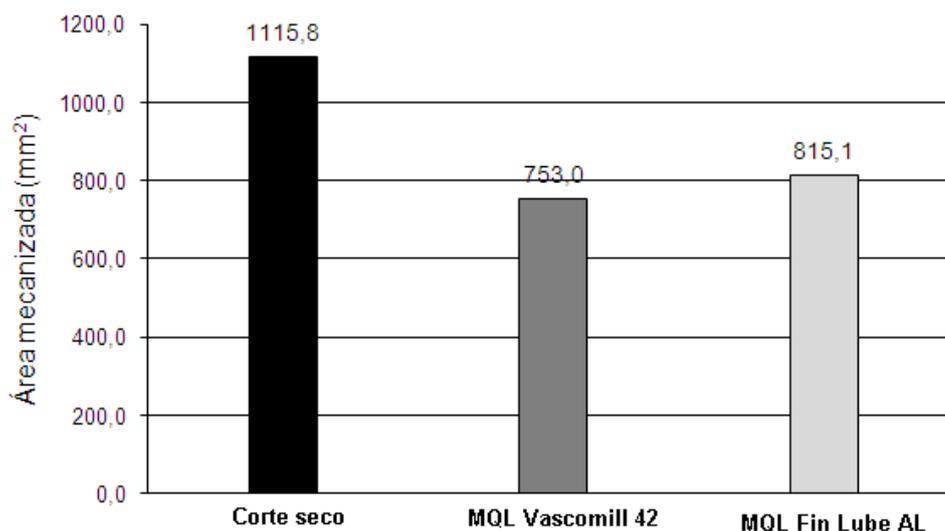


Figura 2. Área mecanizada por la herramienta (mm²) (MQL: flujo de 12 mL/h y presión de 0,45 MPa). Material del cuerpo de prueba: acero AISI D2.

Con las operaciones de acabado se busca lograr tolerancias pequeñas y elevada calidad superficial y dimensional. Durante el fresado de aceros

endurecidos se recomienda el uso de líquidos refrigerantes debido al aumento de la temperatura, producto del aumento de las velocidades de corte. Para operaciones de acabado se recomienda el uso de técnicas MQL para disminuir el calor generado en la zona de corte y, consecuentemente, el desgaste producido por la pérdida de la dureza de la herramienta a altas temperaturas.

En la Tabla 4 se muestra la vida media de la herramienta durante el fresado de acabado del cuerpo de pruebas de acero AISI D6. Para realizar estos ensayos se aumentó la velocidad de corte y se disminuyó al avance, por lo que al disminuir el área de corte de la herramienta debe aumentar el calor en la interfase de contacto herramienta-viruta-pieza, incrementando la probabilidad de desgaste de la herramienta de corte.

Tabla 4. Vida de la herramienta para cada una de las condiciones de corte

	Réplica	Material	Condición de corte	
			Seco	MQL Fin Lube AL
T (min)	1 ^{ra}	AISI D6	47,6	38,1
T (min)	2 ^{da}	AISI D6	47,4	38,7
T (min)	3 ^{ra}	AISI D6	47,9	39,3
T media		AISI D6	47,6	38,6

Durante el fresado del cuerpo de prueba de acero AISI D6, la vida media de la herramienta con el corte seco fue de 47,6 min; 18,9 % mayor que la vida cuando se usa el aceite integral Fin Lube AL. La disminución de la vida de herramienta durante el corte seco en el cuerpo de prueba de acero AISI D6, si se le compara con la operación de corte del cuerpo de prueba de acero AISI D2, está propiciada por el aumento de la velocidad de corte, lo que produce un aumento de la frecuencia de entrada de dientes de la herramienta en la superficie de trabajo de la pieza.

En la Figura 3 se muestran las curvas de desgaste en función de la cantidad de pasadas de las herramientas utilizadas durante el fresado seco de los cuerpos de prueba y durante el fresado con la aplicación mediante MQL del aceite Integral Fin Lube AL (segunda réplica). En la misma se observa que el desgaste de flanco comenzó a aparecer primero en las herramientas en las que se aplicó líquido refrigerante. El aumento de la velocidad de corte para ambas condiciones propició una disminución de la vida de la herramienta ya que la variación de la dureza de los

materiales mecanizados y el coeficiente de maquinabilidad de ambos materiales es similar.

En las herramientas que se emplearon durante el fresado seco el proceso de desgaste puede haber sido generado por grietas de origen mecánico y pequeños desprendimientos debido al corte interrumpido. En las herramientas que se utilizó lubricante aplicado mediante MQL una mayor variación de la temperatura puede haber promovido también la aparición de grietas de origen térmico.

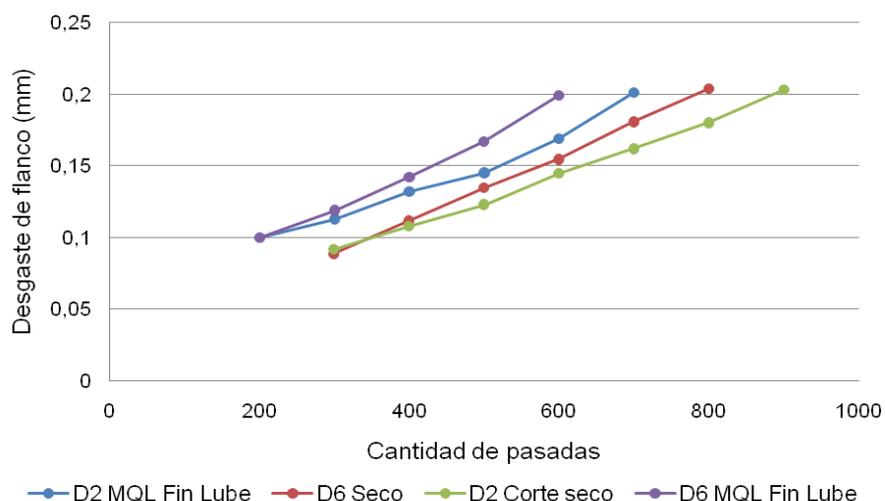


Figura 3. Curvas de desgaste en función de la cantidad de pasadas

En la Figura 4 se muestran los resultados de la MEB y del análisis de Espectroscopia con Energía Dispersa (EED) de la herramienta utilizada durante el fresado seco del cuerpo de prueba fabricado con acero AISI D2. En la misma pueden observarse que en la zona donde se produjo el máximo desgaste de flanco hay una pérdida total del recubrimiento con aparición del núcleo de la herramienta. En esta zona aparece una brecha profunda en la zona de máximo desgaste y adherencia de inclusiones del material de la pieza de trabajo, detectándose hierro, silicio y tungsteno (Detalle 1).

Además, aparecen pequeños desprendimientos de material en toda la región desgastada, no observándose la presencia de desgaste abrasivo en la superficie de incidencia por lo que se puede señalar que el desgaste abrasivo para esta condición experimental no se manifiesta.

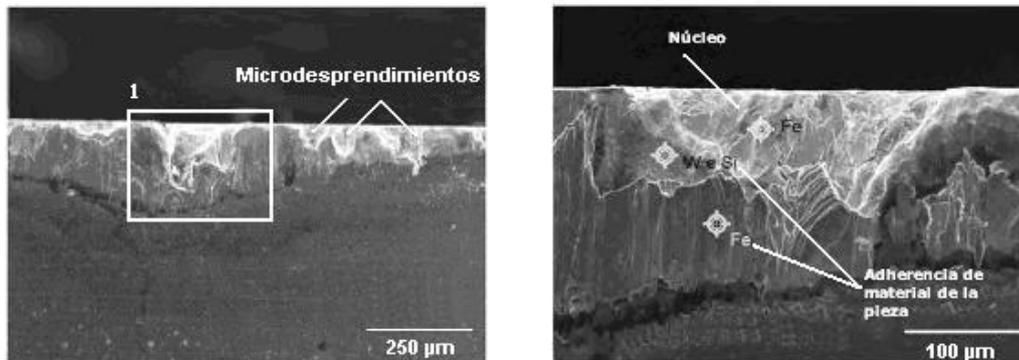


Figura 4. Superficie de incidencia de la herramienta. $V_C = 360$ m/min, incremento radial $ia_e = 0,15$ mm, portaherramientas de metal duro y $\theta = 45^\circ$. $VB_B = 0,203$ mm. Corte seco.

La gran cantidad de inclusiones que están presentes en la muestra dificultan la observación de grietas de origen térmico o mecánico. El desprendimiento 1 que aparece en la zona de máximo desgaste puede tener su origen en grietas de origen mecánico que surgen por la frecuencia de entrada de los dientes de la herramienta en la pieza de trabajo y por la dureza del material mecanizado.

Los pequeños desprendimientos, que se observan en toda la zona desgastada, pueden también estar originados por la presencia de grietas de origen mecánico y que por su profundidad pueden estar comprometiendo la superficie de salida de la herramienta.

En la Figura 5 se muestran los resultados de MEB y EED de la herramienta utilizada durante el fresado MQL con el aceite integral Fin Lube AL del cuerpo de prueba fabricado con acero AISI D2. En la misma podemos observar un desprendimiento profundo (Detalle 1) con aparición del núcleo de la herramienta en la zona donde se produjo el máximo desgaste de flanco, observándose también inclusiones de hierro y silicio y pérdida total del recubrimiento de la herramienta en toda la zona desgastada; igualmente se observa una zona con un desgaste de flanco profundo fuera de la zona de máximo desgaste.

También se observa un patrón de surcos perpendiculares en la zona desgastada que pueden haberse originado debido al surgimiento de grietas de origen térmico, originadas por las mayores variaciones de la temperatura y por desgaste abrasivo.

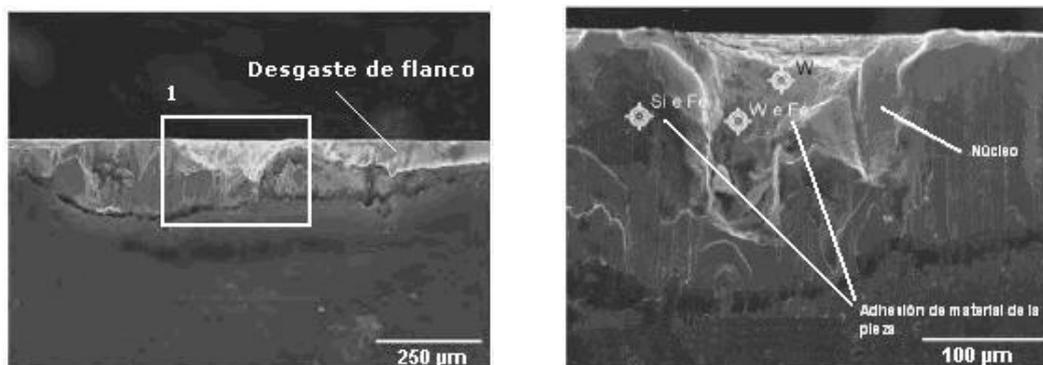


Figura 5. Superficie de incidencia de la herramienta. $V_C = 360$ m/min, incremento radial $ia_e = 0,15$ mm, portaherramientas de metal duro y $\theta = 45^\circ$. $VB_B = 0,201$ mm. MQL Fin Lube AL.

El análisis de EED en la zona de mayor desgaste para ambas condiciones indica un alto contenido de tungsteno y de silicio. El silicio representa apenas el 1 % en masa de la composición química de la pieza de trabajo y por los resultados sugiere una elevada fuerza de adhesión entre este componente y el tungsteno del núcleo de la herramienta de corte. Lo anterior apunta a un mecanismo de desgaste combinado, adherencia, grietas de origen térmico y desprendimientos de la herramienta producidos por los impactos debido a la alta frecuencia de entrada de dientes y a las variaciones de las componentes de la fuerzas de corte por la variación del espesor cortado.

En la Figura 6 se muestran los valores de rugosidad superficial media en el sentido del avance en función de la cantidad de pasadas, medida cada cien pasadas, sin llegar al final de la vida de la herramienta en ninguna de las condiciones de fresado.

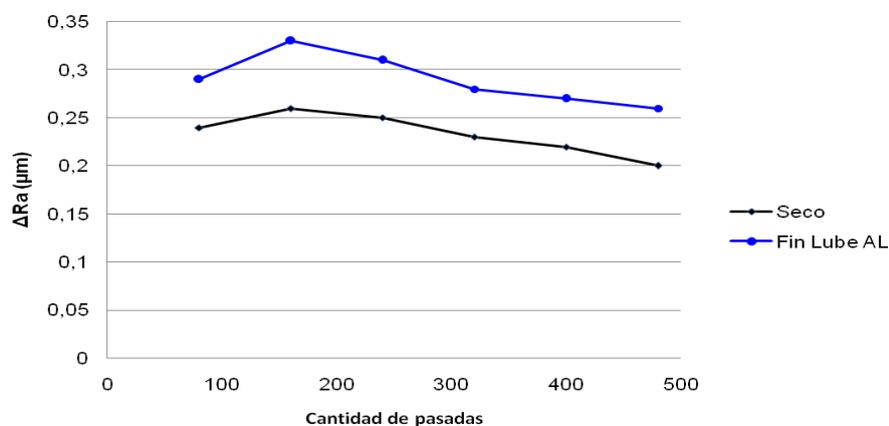


Figura 6. Variación de la rugosidad media de obtenidas en los cuerpos de prueba de acero D6 en el sentido del avance en función de la cantidad de pasadas.

Durante el corte seco la rugosidad superficial de la pieza fue más baja para las tres corridas experimentales, obteniéndose buenos resultados tanto para el corte seco como para el corte con aplicación MQL.

Es importante señalar, desde el punto de vista ecológico, que la aplicación de MQL, aún utilizando un flujo de 12 ml/h, genera una neblina formada por la aplicación del aceite, suficiente para dificultar el monitoreo de los valores de rugosidad superficial de la pieza y de desgaste de las herramientas. Por lo que, al interrumpir el proceso para realizar el monitoreo de las variables, se hace necesario abrir unos minutos la puerta de la máquina herramienta para que la neblina se disipe y limpiar las superficies de la pieza y de la herramienta. Esta neblina está formada por gases y partículas en suspensión que afectan las vías respiratorias y la piel de los operarios.

Es por ello que en ambientes productivos la aplicación de MQL en procesos de maquinado, además de requerir una instalación especial para la aplicación del lubricante, también se necesita emplear un sistema de extracción de gases en la máquina herramienta que garantice la disminución de la contaminación ambiental en el puesto de trabajo y el taller en general.

4. CONCLUSIONES

Se comprobó que durante el mecanizado seco del acero AISI D2 y AISI D6 se produjo un aumento de la vida de la herramienta, por lo que también se incrementan los tiempos entre cambios de herramental, generando mayor productividad del proceso.

Durante el corte seco la rugosidad superficial de la pieza fue más baja para las tres corridas experimentales, por lo que se comprueba la viabilidad del uso del corte seco para la obtención de mejores acabados superficiales.

En las herramientas que se emplearon durante el fresado seco el proceso de desgaste se genera por grietas de origen mecánico, adherencia y pequeños desprendimientos debido a la elevada frecuencia de entrada de dientes, sin embargo, en las herramientas en las cuales se utilizó lubricante aplicado mediante MQL se produjo un desgaste combinado, adherencia, grietas de origen térmico y desprendimientos en el borde cortante de la herramienta.

La aplicación del corte seco propicia la eliminación de los líquidos lubricantes en el fresado de aceros herramientales endurecidos disminuyendo el impacto de este proceso en el medio ambiente.

5. REFERENCIAS

- ASTM International. Norma ASTM E39-84. 1984: Methods for chemical analysis of nickel. *Metals Handbook, Analytical Chemistry for Metals, Ores, and Related Materials*. USA, p. 66.
- ASTM International. Norma ASTM E350-2012: Standard test methods for chemical analysis of carbon steel, low-alloy steel, silicon electrical steel, ingot iron, and wrought iron. *Metals Handbook, Analytical Chemistry for Metals, Ores, and Related Materials*. USA, p. 65.
- ASTM International. Norma ASTM E353-2014: Standard test methods for chemical analysis of stainless, heat-resisting, maraging, and other similar chromium-nickel-iron alloys. *Metals Handbook, Analytical Chemistry for Metals, Ores, and Related Materials*. USA, p. 44.
- BRAGHINI, A.; DINIZ, A. E. & TEIXEIRA, F. 2009: Tool wear and tool life in end milling of 15-5 PH stainless steel under different cooling and lubrication conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 43(7): 756-764.
- BRUNI, C.; D'APOLITO, L.; FORCELLESE, A.; GABRIELLI, F. & SIMONCINI, M. 2008: Surface roughness modelling in finish face milling under MQL and dry cutting conditions. *International Journal of Material Forming* 1(1): 503-506.
- COSMA, M. 2011: Experimental studies on influence of tool path in 3-axes B.N.E.M. on inclined surfaces at 45 degrees. *Academic Journal of Manufacturing Engineering* 9(4): 30-35.
- DAVIES, M. A.; BURNS, T. J. & SCHMITZ, T. L. 1999: High-speed machining processes: dynamics on multiple scales. In *Proceedings of the Workshop of COST P4 WG2 on Dynamics and Control of Mechanical Processing, Budapest, Hungary*, November, p. 7-19.
- DE OLIVEIRA, A. J. 2007: *Análise do desgaste de ferramentas no fresamento com Alta Velocidade de aços endurecidos*. Tesis doctoral. Universidade Estadual de Campinas. Brasil.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C. & COPPINI, N. L. 2010: *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Sétima edição. Editora Artliber, São Paulo.
- FALLBÖHMER, P.; RODRÍGUEZ, C. A.; ÖZEL, T. & ALTAN, T. 2000: High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 98(1): 104-115.
- GOMES, J. O. 2001: *Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be*. Florianópolis. Tesis de doctorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 150 p.

- NICOLA, G. L.; ZEILMANN, R. P. & MISSEL, F. P. 2009: Textura superficial no acabamento do aço endurecido em planos inclinados. *Máquinas e Metais XLV*(516). Aranda Editora. São Paulo.
- PIVETTA, C. S. 2005: *Uma contribuição ao estudo do fresamento de aço endurecido com fresa de topo esférico*. Tesis de maestría. Universidade Estadual de Campinas. Brasil.
- RAEL, V. & DINIZ, A. E. 2004: Utilização do corte seco, da mínima quantidade de fluido e do corte em abundancia no fresamento de matriz endurecida usando high speed machining. Anais do Congresso Usinagem. Aranda Eventos, São Paulo, 1-8.
- RAHMAN, M.; KUMAR, A. S. & SALAM, M. U. 2002: Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42(5): 539-547.
- SÁNCHEZ HECHAVARRÍA, Y. 2008: Mecanizado Seco. Conferencia impartida en la segunda edición de la maestría en Procesos de Manufactura y Materiales. Universidad de Oriente. Cuba.
- SIVAK, M.; MARTÍNEZ, D. & MACEIRA, G. 2002: El mecanizado de alta velocidad (MAV). Procesos Industriales. Cuarta Jornada de Desarrollo e Innovación.
- SU, Y.; HE, N.; LI, L.; IQBAL, A.; XIAO, M. H.; XU, S. & QIU, B. G. 2007: Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47(6): 927-933.
- TOH, C. K. 2004: Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. *Precision Engineering* 4(28): 386-398.
- TOSUN, N. & PIHTILI, H. 2010: Gray relational analysis of performance characteristics in MQL milling of 7075 Al alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46(5-8): 509-515.
- VIEIRA, J. M.; MACHADO, A. R. & EZUGWU, E. O. 2001: Performance of cutting fluids during face milling of steels. *Journal of Materials Processing Technology* 116(2): 244-251.

Maritza Mariño-Cala marino@fim.uo.edu.cu

Profesora Titular. Departamento de Manufactura y Materiales
Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

Yanier Sánchez-Hechavarría yanier@dmm.uo.edu.cu

Profesor Auxiliar. Departamento de Manufactura y Materiales
Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.