

Estudio del desgaste del flanco de carburos recubiertos y cermet durante el torneado de alta velocidad en seco del acero AISI 1045^(*)

L. W. Hernández-González*, R. Pérez-Rodríguez*, P. Zambrano-Robledo**,
M. Guerrero-Mata** y L. Dumitrescu*

Resumen

El objetivo de este trabajo es el estudio experimental de la evolución del desgaste del flanco respecto al tiempo de dos insertos de carburo recubiertos y un cermet durante el torneado de acabado en seco del acero AISI 1045 con velocidades de corte de 400, 500 y 600 m/min. Los resultados fueron comparados utilizando el análisis de varianza y el análisis de regresión lineal para describir la relación entre el desgaste del flanco y el tiempo de maquinado, obteniéndose la ecuación del modelo ajustado. La investigación demostró un efecto significativo de la velocidad de corte y del tiempo de maquinado en el desgaste del flanco en el maquinado de alta velocidad. El mejor desempeño se obtuvo para el carburo recubierto con tres capas, mientras que el carburo con dos capas sufrió el mayor desgaste a elevadas velocidades de corte.

Palabras clave

Torneado de alta velocidad; Desgaste del flanco; Acero AISI 1045; Estudio experimental; Análisis de varianza.

Flank wear study of coating carbides and cermet inserts during the dry high speed turning of AISI 1045 steel

Abstract

This work deals with the experimental study of the flank wear evolution of two coating carbide inserts and a cermet insert during the dry finishing turning of AISI 1045 steel with 400, 500 and 600 m/min cutting speeds. The results were analyzed using the variance analysis and lineal regression analysis in order to describe the relationship between the flank wear and machining time, obtaining the adjusted model equation. The investigation demonstrated a significant effect of cutting speed and machining time on the flank wear at high speed machining. The three coating layers insert showed the best performance while the two layers insert had the worst behaviour of the cutting tool wear at high cutting speeds.

Keywords

High speed turning; Flank wear; AISI 1045 steel; Experimental study; Analysis of variance.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de componentes mecánicos de alta calidad, gran exactitud y menores tiempos de entrega para sistemas de elevado desempeño ha aumentando considerablemente en los últimos años a nivel mundial. Este hecho ha provocado el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a los procesos de corte de metales. El desarrollo integral de las máquinas herramienta, de las herramientas de corte y de la tecnología de maquinado posibilitó la aplicación del corte de

metales con altas velocidades. El aumento de las velocidades de corte es una de las formas de incrementar la eficiencia de los procesos productivos a través de la reducción de los tiempos de fabricación. Por ser un proceso relativamente nuevo, introduciéndose a partir de la década de los años 90, existen muchas cuestiones tecnológicas que están sin respuesta aún^[1].

El maquinado de alta velocidad (*High Speed Machining, HSM*) o con mayor precisión, el corte de alta velocidad (*High Speed Cutting, HSC*) ha sido de interés especial para los sectores académicos e

(*) Trabajo recibido el día 02 de Julio de 2010 y aceptado en su forma final del día 14 de Enero de 2011.

* Universidad de Holguín. Facultad de Ing. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Av. XX Aniversario s/n. Piedra Blanca. Holguín. GP 57. CP 80100. Cuba. E-mail: {wilfredo, roberto.perez, dumitrescu}@facing.uho.edu.cu.

** Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ing. Mecánica y Eléctrica. Centro de Desarrollo, Investigación e Innovación Tecnológica. Av. Pedro de Alba s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 66451. Apartado Postal 076 Suc. "F" San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. E-mail: patricia.zambrano@uanl.mx.

industrial por muchos años^[2]. La influencia del HSC en el desempeño del maquinado está dado en que permite un alto valor de metal removido y muy buena rugosidad superficial, disminuyendo al mismo tiempo las fuerzas de corte y la vida útil de la herramienta. Por ello, son necesarios materiales de corte avanzados para compensar la reducción de la vida de la herramienta. La aparición de los recubrimientos de pequeño espesor y de los procesos de difusión térmica han revolucionado la industria del corte de metales en los últimos 30 años. Estos métodos encuentran una aplicación creciente y aportan ventajas significativas a sus usuarios^[3]. La utilización de las herramientas de corte recubiertas constituye otra opción para el HSC y se debe continuar estudiando su desempeño.

La capacidad de predecir la vida útil de la herramienta de corte es necesaria para el diseño y la estrategia de cambio de las mismas, así como para la determinación de las condiciones de corte. Algunos de los problemas que se presentan son la complejidad del proceso de maquinado y la carencia de datos apropiados. La situación es agravada adicionalmente por el desarrollo continuo y la introducción de nuevos materiales de herramientas, materiales de trabajo y por los cambios en las condiciones de maquinado (por ejemplo, el corte de alta velocidad)^[4].

El desgaste de la herramienta provoca efectos indeseables tales como: una menor exactitud dimensional de la pieza terminada, posibles daños a la pieza, disminución de la integridad superficial, tensiones residuales, rugosidad superficial y ampliación de las vibraciones durante el proceso de corte. Por estas razones es importante evaluar el desgaste y predecir la vida de la herramienta^[5]. En la práctica el desgaste del flanco es el más utilizado en la determinación de la vida útil de la herramienta de corte. El desgaste del flanco se debe al desgaste adhesivo o abrasivo causado por las fases endurecidas del material de la pieza^[7]. Del mismo modo los fluidos de corte han sido utilizados por mucho tiempo, esencialmente para disminuir la temperatura de la herramienta de corte y con ello su desgaste. Su utilización implica costes adicionales dentro de los costes totales de fabricación. Es bien conocido los efectos de los fluidos de corte en la salud del operario y en el medio ambiente, por lo que en las últimas décadas ha crecido el interés de encontrar alternativas para disminuir o atenuar estos inconvenientes. Entre las tecnologías fundamentales para mitigar los efectos de los fluidos de corte se encuentran el corte en seco, el corte amortiguado o de mínima cantidad de fluido, la utilización de recintos con respiraderos alrededor de la operación de maquinado y el desarrollo de nuevas fórmulas de fluidos de corte.

En los últimos años ha crecido el número de investigaciones relacionadas con la evaluación de la vida

útil de las herramientas de corte utilizando diferentes tecnologías de refrigeración para las operaciones de corte de metales, sin embargo, son escasos los estudios desarrollados en la operación de torneado en seco a elevadas velocidades de corte de los aceros de construcción al carbono utilizados en la fabricación de elementos de máquinas. A continuación se muestra un resumen de los trabajos investigativos más relevantes en la elaboración del acero AISI 1045.

Lim *et al.*^[8] obtuvieron el mapa de desgaste del flanco y del cráter de la herramienta de carburo recubierto con TiC utilizando hasta 400 m/min como velocidad de corte durante la elaboración en seco. Luego, Schulz^[9] midió el desgaste del flanco para una herramienta de cerámica variando la velocidad de corte hasta 600 m/min. Eduardo y Oliveira^[10] estudiaron en los carburos P15 y P25 recubiertos con TiCN/Al₂O₃/TiN el desgaste del flanco y el volumen de material removido durante el cilindrado de desbaste en seco y con fluidos, utilizando 290 y 350 m/min de velocidad de corte.

Por otro lado, Obikawa *et al.*^[11] investigaron el desgaste del flanco y de la punta del carburo recubierto con TiC/TiCN/TiN para la operación de ranurado utilizando la mínima cantidad de fluidos con valores de 240 y 300 m/min de velocidad de corte. Tanaka *et al.*^[12] evaluaron el desgaste del flanco y el desgaste máximo del cráter para varios carburos y cermet sin recubrimiento, durante la elaboración en seco de varios aceros de maquinado libre y el acero AISI 1045 tomado como referencia, utilizando hasta 500 m/min de velocidad de corte. Ariza y Sánchez^[13] determinaron el desgaste del flanco y la vida útil de la herramienta del carburo recubierto con TiC/Al₂O₃/TiN en el torneado en seco utilizando hasta 400 m/min de velocidad de corte. Bhattacharya *et al.*^[14] evaluaron el efecto de los parámetros de corte en la rugosidad superficial y la potencia consumida en el torneado duro en seco de alta velocidad del acero AISI 1045 con el inserto P-1025 recubierto con TiC/TiN.

Por otro lado, Lin^[15] realizó el estudio de la fiabilidad de la herramienta a través del efecto de la velocidad de corte y del avance en el desgaste del flanco durante el torneado en seco a velocidades moderadas y altas del acero AISI 1055. Stanford^[16] investigó la influencia de varios métodos de aplicación de los fluidos de corte incluyendo el maquinado en seco del acero AISI 1015, en el desgaste del cráter y del flanco de un carburo sin recubrimiento utilizando hasta 400 m/min de velocidad de corte.

Del análisis anterior se aprecia que numerosos aspectos de este proceso de alto desempeño están siendo aún investigados. Existe poca información en las áreas de estudio de las vibraciones y el desgaste de las herramientas de corte, asociadas al proceso HSC, durante la elaboración en seco de los aceros de

construcción al carbono utilizados en la fabricación de elementos de máquinas. Por tanto, el presente trabajo tiene por objetivo el estudio experimental durante el torneado de acabado en seco a moderada, intermedia y alta velocidad de corte del acero al carbono AISI 1045, evaluando el comportamiento del desgaste del flanco de dos insertos de carburo recubiertos y un inserto de cermet sin recubrimiento.

2. DESARROLLO

A continuación se muestran los elementos que se tuvieron en cuenta para la selección del criterio de desgaste del flanco para la definición de la vida útil de la herramienta de corte. Posteriormente se explica el procedimiento experimental utilizado en la investigación incluyendo la caracterización del material de las herramientas de corte y de la pieza utilizadas en el estudio. Se analiza el montaje experimental y el diseño de la investigación.

2.1. Criterio de desgaste del flanco para la definición de la vida útil de la herramienta

La vida útil de la herramienta se define como el tiempo de corte transcurrido antes de que la misma falle. La norma ANSI/ASME B94.55M recomienda este criterio de desgaste para insertos de carburo y de cerámica con un valor de $VB_B = 0,3$ mm^[18]. Estudios más recientes como los de Bouzid^[7] y Bouzid *et al.*^[18] durante el torneado de alta velocidad del acero AISI 4340 definieron el desgaste del flanco experimentalmente

en función de la velocidad de corte. Ariza y Sánchez^[13] durante el torneado del acero AISI 1045 utilizando hasta velocidades de corte moderadas, adoptaron $VB_B = 0,19$ mm de acuerdo a los resultados que obtuvieron. Las recomendaciones utilizadas en la práctica industrial para limitar el desgaste del flanco para las elaboraciones de acabado es de $VB_B = 0,25$ mm para los insertos de carburo recubierto y hasta $VB = 0,20$ mm para los insertos de cerámica^[3]. En el presente trabajo fue asumido como criterio de desgaste del flanco $VB_B = 0,2$ mm teniendo en cuenta los resultados de la revisión de la literatura científica y que se trata de una elaboración de acabado a moderada, intermedia y alta velocidad de corte.

2.2. Procedimiento experimental

A continuación se expone la caracterización del material de la pieza a maquinarse y de los insertos utilizados en el estudio experimental.

2.2.1. Material de la pieza

Se utilizó el acero al carbono AISI-SAE 1045 obtenido en los procesos de fundición y laminado en caliente, de gran aplicación a nivel mundial en la construcción de elementos para la industria metalmeccánica e industria automotriz. Es un acero que se puede tomar como patrón típico crítico para la construcción de elementos de máquinas debido a que su composición es ferrito perlítica al 50 % (Fig. 1), con un porcentaje medio de carbono que para su grupo es el máximo, lo que favorece sus propiedades mecánicas pero dificulta la maquinabilidad. La composición química en porcentajes de la pieza aparece en la tabla I.

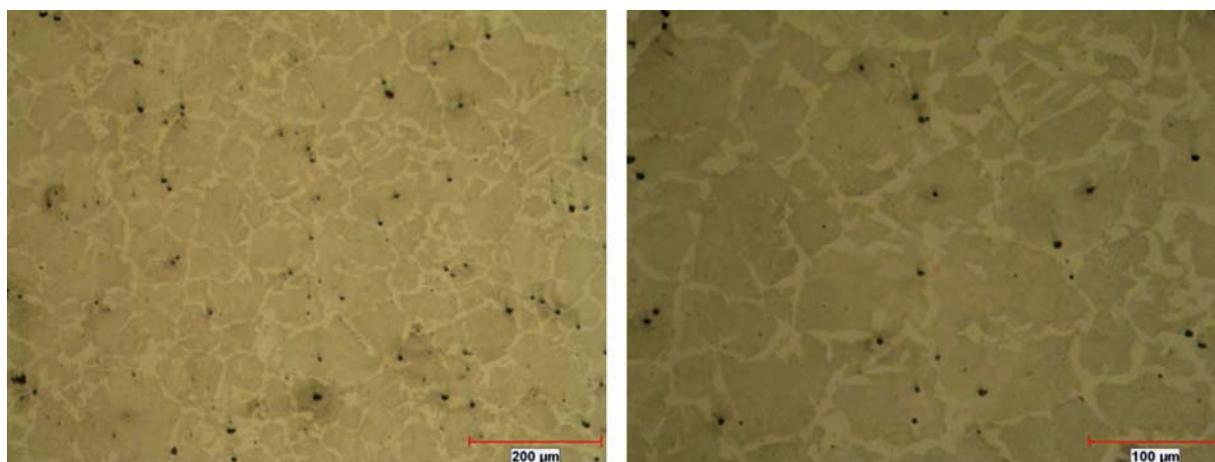


Figura 1. Microestructura de la pieza con amplificación de x100 (a) y x200 (b).

Figure 1. Microstructure of the part with magnification of 100x (a) and 200x (b).

De acuerdo a la norma ANSI/ASME B94.55M^[17] el contenido máximo de fósforo debe ser 0,035 %, por tanto, este contenido ligeramente superior tiene el efecto de disminuir el coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta al reducir las fuerzas de corte. El contenido del resto de los elementos se encuentran dentro de los márgenes preestablecidos.

La microestructura (Fig. 1) y el tamaño del grano (fino de 8 µm) se examinaron sobre toda la sección transversal de la probeta en un microscopio óptico NIKON EPIPHOT. Este tipo de granulometría influye desfavorablemente en la maquinabilidad. La presencia de un mayor borde del grano y por lo tanto de muchas zonas de alta energía, implica un aumento de los esfuerzos para producir el corte.

La dureza de las probetas fueron medidas en un micro durómetro SHIMADZU obteniéndose una dureza promedio de HB 258. Se utilizaron 10 probetas cilíndricas macizas centradas por ambas caras de diámetro 80 mm y longitud 300 mm, la relación longitud/diámetro se mantuvo inferior a 10 para evitar vibraciones durante el mecanizado.

2.2.2. Herramientas de corte

Como insertos con marcación SANDVIK^[20] fueron utilizados el cermet sin recubrimiento CT5015-P10 y los metales duros recubiertos CVD GC4215-P15 y

GC4225-P25. En la tabla II se indica el convenio utilizado y los estudios realizados utilizando el microscopio electrónico de barrido marca JEOL para determinar el tipo y espesor del recubrimiento. Del mismo modo se determinó la composición química de los substratos de los insertos que se muestran en la tabla III.

La geometría seleccionada para los tres insertos fue la CCMT 12 04 04-PF con rompevirutas. Las plaquitas fueron utilizadas sobre un portaherramientas marca SANDVIK^[20] de referencia SCLCR/L 2020K 12. Cuando se montaron las herramientas en el vástago, el ángulo de posición principal del filo de corte fue de 95°, el ángulo de ataque fue de 0°, el ángulo de incidencia principal fue de 7° y el ángulo de inclinación de filo de corte fue de 0°. Estas herramientas tienen filos de corte redondeados con un radio de 0,4 mm.

Se realizó la inspección previa de cada filo de corte en un microscopio óptico NIKON EPIPHOT con una amplificación de 50X para detectar defectos visuales como fragmentos o grietas. En general se observó un buen estado del filo de corte.

Con la utilización de un rugosímetro marca CARL ZEISS se midió la rugosidad superficial de los insertos en la superficie de incidencia principal y de ataque. Los resultados arrojaron como promedio que la rugosidad superficial R_a para ambas superficies es menor de 0,25 µm, lo que está en correspondencia a lo establecido por la norma ANSI/ASME B94.55M^[17].

Tabla I. Composición química del material de la pieza

Table I. Chemical composition of the part material

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Ni	Al	Cu
Composición %	0,4577	0,152	0,714	0,0369	0,0068	0,1221	98,41	0,024	0,0353	0,0189
Elemento	Nb	Ti	V	W	Sn					
Composición %	0,001	0,0028	0,004	<0,010	0,005					

Tabla II. Identificación, tipo y espesor del recubrimiento de los insertos

Table II. Identification, type and thickness of the insert coatings

Inserto	Convenio	Primera capa	Segunda capa	Tercera capa	Espesor total del recubrimiento (µm)
CT5015-P10	A	—	—	—	—
GC4215-P15	B	TiN	Al ₂ O ₃	Ti(N,C)	15
GC4225-P25	C	Ti(C,N)	Al ₂ O ₃	—	10

Tabla III. Composición química del sustrato de los insertos*Table III. Chemical composition of the insert substrates*

Inserto	Composición química (%)				
	W	Ti	Co	Nb	Al ₂ O ₃
A	20,68	47,20	17,71	08,71	05,7
B	96,19	01,44	02,38	–	–
C	94,77	02,10	03,13	–	–

Asimismo, fue medida la dureza de los insertos en varios puntos en la superficie de ataque en un micro durómetro SHIMADZU y se obtuvo como valores promedios: 2046 HV para el inserto A, 1631 HV para el inserto B y para el inserto C, 1789 HV. En el caso de los metales duros la dureza está dada principalmente por la dureza de las capas de los recubrimientos. En el caso del cermet la dureza promedio obtenida fue uniforme.

2.2.3. Máquina herramienta

Fue utilizado un torno CNC marca MILLTRONICS modelo ML-14 con una potencia del motor de 9/7,5 kW, una gama de velocidad de rotación del husillo que oscila entre 100 y 3.000 rpm, el diámetro máximo a elaborar sobre el carro lateral es de 198 mm y la longitud máxima que permite maquinarse es de 775 mm.

2.3. Montaje experimental y diseño factorial de la investigación

La investigación consistió en determinar la progresión del desgaste del flanco de tres insertos durante el torneado de acabado en seco a moderada, intermedia y alta velocidad de corte. La pieza se montó entre plato y punto. La profundidad de corte ($a = 0,5$ mm) y el avance ($f = 0,1$ mm/rev) se mantuvieron constantes durante todas las pruebas. En la tabla IV aparecen las variables estudiadas.

Los experimentos fueron conducidos utilizando tres niveles de material de la herramienta, tres niveles de velocidades de corte y cinco niveles de tiempo de maquinado para la medición del desgaste. Se realizaron dos réplicas con cada juego de datos para la adquisición de la información, por lo que en total fueron realizados 90 experimentos. Se realizaron corridas pilotos para comprobar todas las condiciones de experimentación, equipos de medición, máquina herramienta y herramientas de corte.

Tabla IV. Variables consideradas en el estudio*Table IV. Evaluated variables in study*

Variable	Tipo de variable	Medida
Desgaste de la herramienta	Dependiente	Desgaste del flanco (mm)
Material de la herramienta	Independiente	Carburos GC4215 (P15 según ISO) y P25 (según ISO) GC4225 recubiertos y P10 cermet CT5015 sin recubrimiento
Velocidad de corte	Independiente	400, 500 y 600 m/min
Tiempo de maquinado	Independiente	Tiempo de maquinado (min). Cinco mediciones (2, 4, 6, 8 y 10 min para 400 m/min), (1, 2, 3, 4 y 5 min para 500 m/min) y (0,6; 1,2; 2; 3 y 4 min para 600 m/min)

Los parámetros de corte seleccionados están en correspondencia con las recomendaciones del fabricante de las herramientas de corte, excepto cuando se utilizaron valores por encima del límite establecido (500 y 600 m/min de velocidades de corte) para evaluar el comportamiento de los insertos a estos niveles de velocidades. Se debe señalar que los valores recomendados son válidos solo en caso de utilizar refrigerante y para un acero de contenido medio de carbono de 150 HB de dureza. En el presente estudio el corte es en seco y la dureza de la pieza es de 258 HB.

Se utilizaron los dos filos de corte de cada inserto que proporciona la misma cara. Se cilindró la pieza comenzando con un filo nuevo y el corte fue interrumpido cada cierto tiempo (Tabla IV) para medir el ancho de desgaste del flanco utilizando un microscopio electrónico de barrido marca JEOL. La medición del desgaste fue efectuada acorde a la norma ANSI/ASME B94.55M^[17]. Se utilizaron varias piezas de acero AISI 1045 para evitar cualquier efecto de confusión entre las mismas. La selección de la pieza para cada corrida fue completamente aleatoria.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo fundamental del trabajo es evaluar el comportamiento del desgaste del flanco de los insertos en función del tiempo para las tres velocidades de corte analizadas. En la figura 2 se muestra la medición del desgaste del flanco de los insertos. Para el inserto A utilizando $v = 500$ m/min (Fig. 2 a)) y $v = 600$ m/min (Fig. 2 b)); para el inserto B utilizando $v = 500$ m/min (Fig. 2 c)) y $v = 600$ m/min (Fig. 2 d)); y para el inserto C empleando $v = 500$ m/min (Fig. 2 e)) y $v = 600$ m/min (Fig. 2 f)), para 5 min y 4 min de tiempo de maquinado respectivamente. En esta figura se observa el desgaste intensivo para la velocidad de corte intermedia (500 m/min) y el desgaste catastrófico para la velocidad de corte alta (600 m/min) que sufrieron los insertos A y C. Sin embargo, el inserto B reveló un mejor comportamiento.

En la figura 3 a) se muestra la gráfica de evolución del desgaste del flanco de los insertos con el tiempo de maquinado para la velocidad de corte moderada ($v = 400$ m/min), en la que se puede apreciar una mejor tendencia de desgaste del inserto B, le siguió el inserto C y el peor resultado fue para el inserto A que llegó al límite del criterio de fin de vida mucho antes de terminar el tiempo de maquinado final (10 min), en comparación con los insertos B y C que no alcanzaron el límite establecido.

En la figura 3 b) se observa la gráfica de evolución del desgaste del flanco de los insertos *versus* el

tiempo de maquinado para 500 m/min de velocidad de corte. En la misma se aprecia una mejor tendencia de desgaste del inserto B, le siguió el inserto C y el peor resultado fue para el inserto A. Estos dos últimos insertos llegaron al límite del criterio de fin de vida establecido mucho antes del tiempo de maquinado final (cinco minutos) en comparación con el inserto B que no alcanzó el límite del criterio de fin de vida.

Para la velocidad de corte de 600 m/min (Fig. 3 c)) el mejor comportamiento en cuanto a la tendencia de desgaste fue también para el inserto B, en cambio, los filos de corte de los insertos A y C se desmoronaron antes de llegar al tiempo final de maquinado. El inserto A tuvo una mejor tendencia que el inserto C, lo que se debe a que cuando este último pierde sus dos capas de recubrimiento el sustrato queda desprotegido y el desgaste crece intensamente. Por último, en la figura 3 d) se compara las tendencias del desgaste de los tres insertos para los diferentes valores de velocidad de corte. Se aprecia que el inserto B presenta la mejor tendencia en el desgaste para el torneado de acabado en seco aún a 600 m/min de velocidad. El carburo recubierto C reveló una tendencia aceptable del desgaste para la velocidad de corte moderada. Se muestra que los insertos A y C podrían maquinar un tiempo restringido utilizando $v = 500$ m/min para las condiciones de elaboración dadas antes de llegar al criterio de desgaste asumido.

De las figuras 2 y 3 se puede concluir que cuando se utilizan incrementos de velocidades de corte en el intervalo entre 400 y 600 m/min, ocurre un aumento del desgaste del flanco de las herramientas de corte objeto de estudio. Se destaca que el inserto tipo B dispone de una mejor tendencia en el desgaste y puede ser utilizado para maquinar a velocidades superiores a las que establece su fabricante.

Por otro lado, se realizó el análisis de varianza simple para el desgaste de los insertos con el objetivo de comparar los valores medios de desgaste del flanco de los tres niveles de herramienta de corte utilizando el software STATGRAPHICS Plus versión 5.1. En la tabla V se muestran los resultados de la comparación para la velocidad de corte moderada (400 m/min). Puesto que el p-valor del test F es inferior a 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre el desgaste medio de un nivel de inserto a otro para un nivel de confianza del 95 %.

Fue aplicado el procedimiento de comparación múltiple para determinar las medias del desgaste del flanco de los insertos que son significativamente diferentes unas de otras. El método utilizado para discernir entre las medias fue el de las menores diferencias significativas (LSD) de Fisher. El resultado del análisis mostró que el grupo más homogéneo es el C, que es similar al grupo A y a la vez al grupo B.

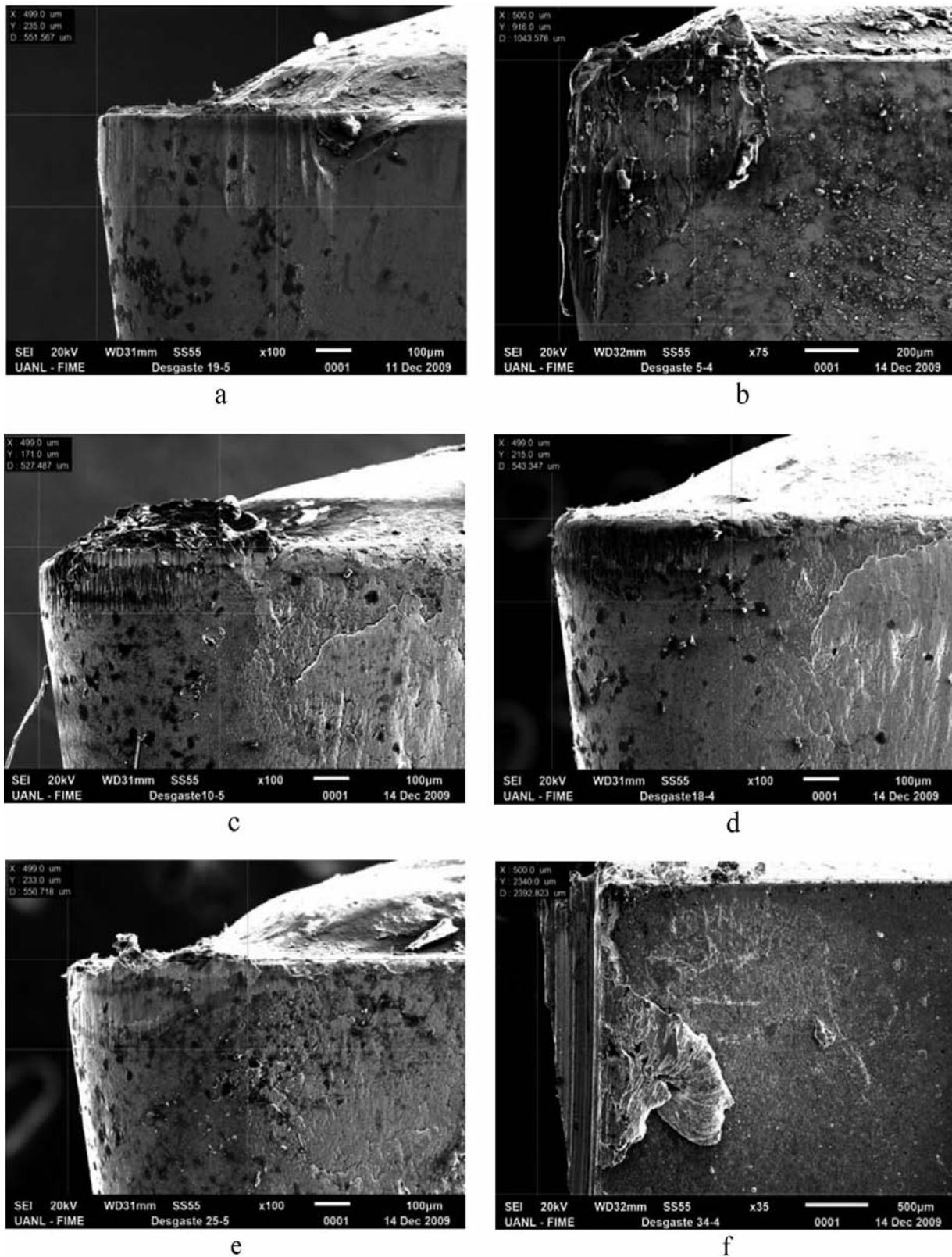


Figura 2. Desgaste del flanco de los insertos A (a), B (c) y C (e) para $v = 500$ m/min, y de los insertos A (b), B (d) y C (f) para $v = 600$ m/min, para un tiempo de maquinado de 5 min y 4 min respectivamente.

Figure 2. Flank wear of the inserts A (a), B (c) y C (e) for $v = 500$ m/min, and of the inserts A (b), B (d) and C (f) for $v = 600$ m/min, for 5 min and 4 min of machining time respectively.

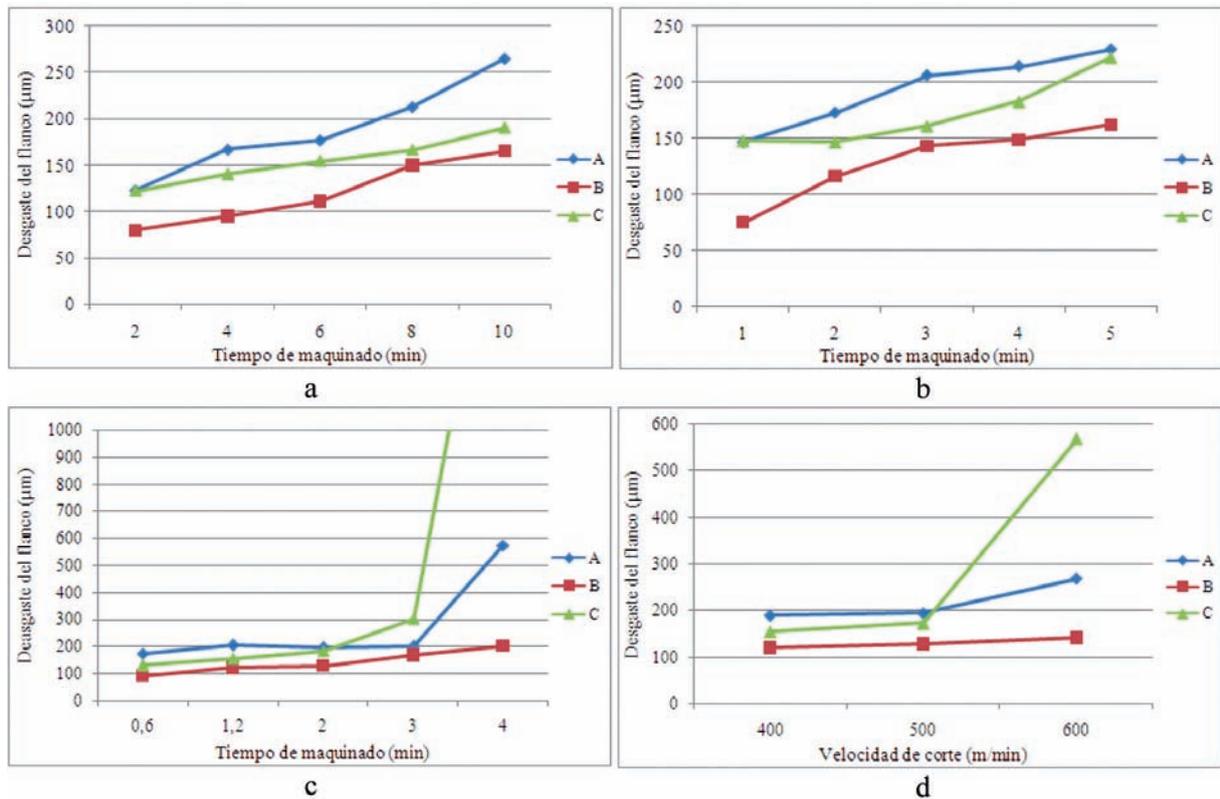


Figura 3. Evolución del desgaste del flanco de los insertos con el tiempo de maquinado para $v = 400$ m/min (a), $v = 500$ m/min (b) y $v = 600$ m/min (c), y comparación del desgaste para las tres velocidades de corte (d).

Figure 3. Evolution of the flank wear of inserts with machining time for $v = 400$ m/min (a), $v = 500$ m/min (b) and $v = 600$ m/min (c), and wear comparison for the three cutting speeds (d).

Tabla V. Análisis de la varianza para el desgaste del flanco de los insertos para $v = 400$ m/min

Table V. Analysis of variance for flank wear of inserts using $v = 400$ m/min

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	p-valor
Entre grupos	0,023668	2	0,0118337	7,33	0,0029
Intra grupos	0,043594	27	0,0016146		
Total (Correlación)	0,067262	29			

En la tabla VI se muestra el análisis de regresión simple para describir la relación entre el desgaste del flanco de cada inserto y el tiempo de maquinado para obtener la ecuación del modelo ajustado, utilizando para ello el modelo que presentó el mayor coeficiente de determinación (R^2) con respecto a los demás modelos curvilíneos alternativos.

El coeficiente de correlación indica una relación relativamente fuerte entre desgaste del flanco de los tres insertos y el tiempo de maquinado. Para los tres casos el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01, lo que significa que existe una relación estadísticamente significativa entre desgaste del flanco y tiempo de maquinado para un nivel de confianza del 99 %.

Como se observa en las ecuaciones de la tabla VI, el tiempo de maquinado tuvo un mayor efecto en el desgaste del flanco para el inserto A, le sigue el inserto C y por último el inserto B. Los insertos B y C presentaron un mejor comportamiento del desgaste del flanco, lo cual se debe a que los recubrimientos lo protegieron de la acción de la fricción de la superficie de la pieza durante el proceso de corte.

Para $v = 500$ m/min de velocidad de corte, el p-valor del test F resultó inferior a 0,05 demostrando que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el desgaste medio de un nivel de inserto a otro para un nivel de confianza del 95 %.

La aplicación del procedimiento de comparación múltiple para determinar las medias de desgaste del flanco que son significativamente diferentes mostró que A y C son los grupos homogéneos. La diferencia estimada entre cada par de medias muestra que entre el desgaste del flanco de los insertos A - B y B - C existe una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95 %.

El resultado del análisis de regresión para describir la relación entre el desgaste del flanco de cada inserto

y el tiempo de maquinado utilizando 500 m/min de velocidad de corte se recoge en la tabla VII.

El coeficiente de correlación indica una relación relativamente fuerte entre desgaste del flanco de los insertos y el tiempo de maquinado. Para los tres casos el p-valor de la tabla ANOVA fue inferior a 0,01, lo que significa que existe una relación estadísticamente significativa entre desgaste y tiempo para un nivel de confianza del 99 %. Como se observa en las ecuaciones de la tabla VII, el tiempo de maquinado tuvo un mayor efecto en el desgaste del flanco para el inserto B, le sigue el inserto A y por último el inserto C. Los insertos B y C presentaron un mejor comportamiento en el desgaste del flanco, lo cual se debe a que los recubrimientos lo protegieron de la acción de la fricción de la superficie de la pieza durante el proceso de corte a moderada velocidad.

La comparación en el análisis de la varianza del desgaste del flanco de los tres insertos para 600 m/min de velocidad de corte muestran que el p-valor del test F es 0,1485 (superior a 0,05), por lo que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media del desgaste de un nivel de inserto a otro

Tabla VI. Análisis de regresión simple para el desgaste del flanco de los insertos y el tiempo de maquinado para $v = 400$ m/min

Table VI. Analysis of simple regression for flank wear of inserts and the machining time for $v = 400$ m/min

Inserto	Modelo	Ecuación	Coefficiente R^2 (%)	Coefficiente de correlación
A	Exponencial	Desgaste = $e^{(-2.2322 + 0.0883 \times \text{Tiempo})}$	85,4567	0,924428
B	Exponencial	Desgaste = $e^{(-2.7286 + 0.0952 \times \text{Tiempo})}$	93,4018	0,966446
C	Exponencial	Desgaste = $e^{(-2.1972 + 0.0528 \times \text{Tiempo})}$	90,9891	0,953882

Tabla VII. Análisis de regresión simple para el desgaste del flanco de los insertos y el tiempo de maquinado para $v = 500$ m/min

Table VII. Analysis of simple regression for flank wear of inserts and the machining time for $v = 500$ m/min

Inserto	Modelo	Ecuación	Coefficiente R^2 (%)	Coefficiente de correlación
A	Multiplicativo	Desgaste = $(0.1452 \times \text{Tiempo})^{0.2855}$	84,5472	0,9194
B	Logarítmico X	Desgaste = $0.0773 + 0.539 \times \ln(\text{Tiempo})$	93,6275	0,9676
C	Inverso Y	Desgaste = $\frac{1}{7.7914 - 0.6103 \times \text{Tiempo}}$	90,346	-0,9505

para un 95 % de confiabilidad. La aplicación del procedimiento de comparación múltiple mostró que los tres grupos son homogéneos, es decir, no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los grupos. La diferencia estimada entre cada par de medias reveló que no hay diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95 %. Los resultados del análisis de regresión lineal para describir la relación entre el desgaste del flanco de los insertos y el tiempo de maquinado para la alta velocidad de corte (600 m/min) se muestran en la tabla VIII.

El coeficiente de correlación igual a -0,767413 para el inserto A indica una relación moderadamente fuerte entre el desgaste y el tiempo. Sin embargo, para los insertos B y C revela una relación relativamente fuerte entre las variables. Para los tres casos el p-valor de la tabla ANOVA es inferior a 0,01, es decir, existe una relación estadísticamente significativa entre desgaste y tiempo de maquinado para un nivel de confianza del 99 %.

Como se observa en las ecuaciones de la tabla VIII, el tiempo de maquinado en alta velocidad de corte (600 m/min) tuvo un mayor efecto en el desgaste del flanco para el inserto C, le sigue el inserto A y por último el inserto B. El inserto B presentó el mejor comportamiento en el desgaste del flanco.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se plantean las siguientes conclusiones:

- El desgaste del flanco fue más significativo para los insertos A y C para la velocidad de corte moderada e intermedia, mientras que para la alta velocidad el desgaste fue mayor en los insertos C y A. El Cermet obtuvo un mejor desempeño que el inserto recubierto con dos capas a elevada velocidad de corte. El inserto B fue el de mejor desempeño.
- El análisis de varianza simple del desgaste del flanco para velocidad de corte moderada e intermedia mostró que existe una diferencia estadísticamente significativa al comparar los valores medios de desgaste para los tres niveles de herramientas de corte. Sin embargo, para el corte con alta velocidad no se observó una diferencia significativa.
- El desgaste del flanco aumentó con el tiempo de maquinado para la velocidad de corte moderada en mayor proporción para los insertos A y C, para la velocidad intermedia fue más significativo para los insertos B y A, mientras que para la alta velocidad el incremento fue mayor para los insertos C y A, como lo demuestran las ecuaciones del modelo ajustado obtenidas en el análisis de regresión.
- Los resultados exhiben un buen comportamiento de la tendencia del desgaste en el torneado de acabado en seco para la alta velocidad de corte del carburo recubierto B, teniendo en cuenta que la dureza de la pieza maquinada es superior a lo recomendado por el fabricante de la herramienta de corte y que éstas deben ser utilizadas con refrigerante. Los insertos A y C podrían maquinar un tiempo restringido utilizando $v = 500$ m/min para

Tabla VIII. Análisis de regresión lineal para el desgaste del flanco de los insertos y el tiempo de maquinado para $v = 600$ m/min

Table VIII. Analysis of simple regression for flank wear of inserts and the machining time using $v = 600$ m/min

Inserto	Modelo	Ecuación	Coefficiente R ² (%)	Coefficiente de correlación
A	Inverso Y	Desgaste = $\frac{1}{6.4914 - 0.8166 \times \text{Tiempo}}$	58,8923	-0,767413
B	Raíz cuadrada Y	Desgaste = $0.2848 + 0.0407 \times \ln(\text{Tiempo})^2$	94,473	0,9719
C	Inverso Y	Desgaste = $\frac{1}{7.7914 - 0.6103 \times \text{Tiempo}}$	96,7577	-0,9836

las condiciones de elaboración dadas. El inserto de carburo recubierto C reveló un buen resultado para la velocidad moderada.

- Se comprobaron los resultados de Bouzid^[7], Bouzid *et al.*^[18] y de Ariza y Sánchez^[13] acerca de que la definición del criterio de fin de vida útil de la herramienta de corte para el maquinado de alta velocidad debe estar en correspondencia con la velocidad de corte.
- Para la práctica industrial se recomienda según las ecuaciones obtenidas para las condiciones de elaboración dadas que: para una velocidad de corte moderada durante el corte con el inserto A se puede maquinar hasta un tiempo de 7,7 min sin llegar al límite del criterio de fin de vida útil de desgaste del flanco, para el inserto C hasta 11,6 min y hasta 12,3 min para el inserto B; para la velocidad intermedia se puede cortar con el inserto A hasta 3,06 min, hasta 4,5 min con el inserto C y hasta 9,7 min para el inserto B; y para la alta velocidad de corte se puede maquinar con el inserto A hasta 1,8 min, para el inserto C hasta 2 min y hasta 3,98 min para el inserto B sin alcanzar el límite.

Agradecimientos

Los autores agradecen a PRONABES por proporcionar la beca posgraduada de investigación en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) en México. Se le agradece al Centro de Desarrollo, Investigación e Innovación Tecnológica de la UANL en Monterrey por el apoyo financiero y al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (México, Campus de Monterrey), por todas las facilidades brindadas para el desarrollo del trabajo de investigación. Se agradece al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Holguín por el apoyo brindado.

Nomenclatura

a (mm)	Profundidad de corte
f (mm/rev)	Avance
v (m/min)	Velocidad de corte
VB _B (μm)	Criterio de desgaste del flanco para definir la vida útil de la herramienta

REFERENCIAS

- [1] F. Martínez, T. Sánchez, G. Frías y A. Pinilla, *Rev. Ingeniería Mecánica* 9 (2006) 7-12.
- [2] W. Grzesik, *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*, Ed. Elsevier, Amsterdam, Holanda, 2008, pp. 213-226.
- [3] J.P. Davim. *Machining. Fundamentals and recent advances*, Ed. Springer-Verlag, Londres, Inglaterra, 2008, pp. 37-52.
- [4] J.A. Arsecularatne, L.C. Zhang y C. Montross, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 45 (2005) 131-136.
- [5] A. Devillez, S. Lesko y W. Mozer, *Wear* 256 (2004) 56-65.
- [6] W. Bouzid. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 26 (2005) 330-334.
- [7] C.Y.H. Lim, S-C. Lim y K-S. Lee, *Wear processes in manufacturing*, vol. 1, Bahadur y J. Magee (Eds.), American Society for Testing and Materials STP 1362, Pennsylvania, EE.UU., 1998, pp. 57-70.
- [8] H. Schulz y T. Moriwaki, *CIRP Ann.* 41 (1992) 637-642.
- [9] A. Eduardo y A. Oliveira, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 44 (2004) 1061-1067.
- [10] T. Obikawa, Y. Kamata y J. Shinozuka, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 46 (2006) 1.854-1.861.
- [11] R. Tanaka, Y. Yamane, K. Sekiya, N. Narutaki y T. Shiraga, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 47 (2007) 1.971-1.977.
- [12] L. Ariza y C. Sánchez, Tesis de grado, Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [13] A. Bhattacharya, S. Das, P. Majumder y A. Batish, *Prod. Eng. Res. Devel.* 3 (2009) 31-40.
- [14] W. S. LIN, *Arch. Mater. Sci. Eng.* 30 (2008) 97-100.
- [15] M. Stanford, P. M. Lister, C. Morgan y K.A. Kibble, *J. Mater. Process. Technol.* 209 (2009) 961-972.
- [16] ANSI/ASME B94.55M: 1985 Tool-life testing with single-point turning tools.
- [17] W. Bouzid, A. Zghal y A. Ben, *Int. J. Veh. Des.* 39 (2005) 140-153.
- [18] ASTM E 140: 1997 Standard hardness conversion tables for metals.
- [19] SANDVIK Coromant: Torneado General (2009) A4-A54.