

Análisis experimental del torneado de alta velocidad del acero AISI 1045

Experimental analysis of high speed turning of AISI 1045 steel gears

Luís Wilfredo Hernández-González^I, Roberto Pérez-Rodríguez^I,
Patricia del Carmen Zambrano-Robledo^{II}, Martha Patricia Guerrero-Mata^{II},
Luminita-Dumitrescu^I

I Universidad de Holguín. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica. Holguín. Cuba
Correo electrónico: wilfredo@facing.uho.edu.cu

II Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México

Recibido: 20 de mayo de 2011

Aceptado: 30 de enero de 2012

Resumen

El objetivo de este trabajo es el estudio experimental de la evolución del desgaste del flanco de dos insertos de carburo recubiertos y un cermet, durante el torneado en seco del acero AISI 1045 con 500 y 600 m/min de velocidad de corte. Los resultados fueron comparados utilizando el análisis de varianza y de regresión. La investigación mostró un efecto significativo de la velocidad de corte y del tiempo de maquinado en el desgaste del flanco. El mejor desempeño fue para el carburo recubierto con tres capas, mientras que a elevada velocidad de corte el carburo con dos capas sufrió el mayor desgaste, lo cual se debe a que cuando pierde sus recubrimientos el sustrato del inserto queda desprotegido y el desgaste crece rápidamente por las extremas condiciones del mecanizado por alta velocidad. Además, se plantean recomendaciones del tiempo de maquinado de los insertos dadas las condiciones de elaboración por alta velocidad.

Palabras claves: torneado de alta velocidad, desgaste del flanco, acero AISI 1045, estudio experimental.

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 turning of AISI 1045 steel with 500 and 600 m/min cutting speed. The results were compared using the variance and regression analysis. The investigation showed a significant effect of cutting speed and machining time on the flank wear in 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 speed, this is because once the coating film is peeled off, the substrate of the insert becomes uncovered and the wear grows rapidly due to the extreme machining conditions for high speed. Besides, the machining time recommendations of inserts for the cutting conditions at high speed are exposed.

Key words: high speed turning, flank wear, AISI 1045 steel, experimental study.

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 aumentar 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 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 de corte. Por ello, son necesarios materiales de corte avanzados para compensar la reducción de la vida útil de la herramienta. En la figura 1 se muestran los principales factores que afectan la vida útil de las herramientas de corte. La aparición de los recubrimientos de pequeño espesor y 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.

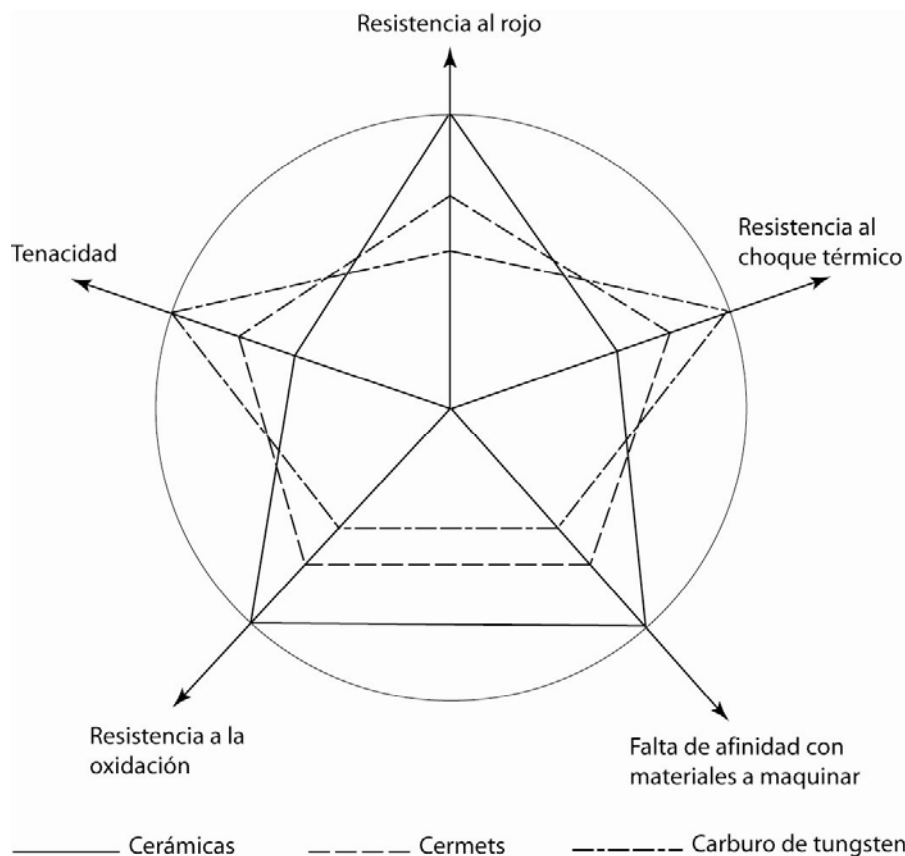


Fig. 1. Principales factores que afectan la vida útil de las herramientas de corte [4].

Actualmente, el 50 % de los aceros de corte rápido, el 85 % de los carburos y el 40 % de los materiales superduros utilizados en la industria, son recubiertos [5].

Los recubrimientos: (a) proporcionan una elevada dureza, (b) aumentan la resistencia (al desgaste abrasivo, adhesivo, del flanco o del cráter), (c) reducen los coeficientes de fricción facilitando el deslizamiento de la viruta, disminuyendo las fuerzas de corte, impidiendo la adhesión en las superficies de contacto, reduciendo el calor generado debido al deslizamiento de la viruta, (d) reducen la porción de energía térmica

que fluye hacia la herramienta, y (e) mejoran la rugosidad superficial de la pieza maquinada [3]. En la tabla 1 se comparan varias de las propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste de algunos de los recubrimientos de herramientas de corte.

Tabla 1. Comparación de propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste de algunos de los recubrimientos de herramientas de corte [2].

Recubrimiento	Efecto de barrera térmica	Habilidad de unión al sustrato	Coefficiente de fricción	Desgaste del flanco	Desgaste del cráter	Tenacidad
TiC	+	++	++	++	+	++
AL ₂ O ₃	++	+	+	+	++	+
TiN	++	++	++	+	+	++
TiCN	+	++	+	++	+	++

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 e introducción de nuevos materiales de herramientas de corte, materiales de trabajo y por los cambios en las condiciones de maquinado (por ejemplo, el corte de alta velocidad) [2].

Por lo tanto, el desgaste de la herramienta de corte se convierte en un factor importante durante el proceso de maquinado. Además, si una herramienta desgastada no es identificada con la suficiente prontitud, puede ocurrir una degradación significativa de la calidad superficial [6], de la exactitud de elaboración y, por ende, un incremento de los costos de fabricación. Es necesario medir el desgaste, así como la comprensión de los mecanismos de desgaste en la herramienta de corte. Este último es clasificado como desgaste del flanco, craterización de la superficie de ataque, desgaste de la nariz y astillado [7]. En la práctica, el desgaste del flanco es el más utilizado en la determinación de la vida útil de la herramienta. El desgaste del flanco se debe al desgaste adhesivo o abrasivo causado por las fases endurecidas del material de la pieza [8].

De acuerdo con varios autores, se acepta de forma general que durante el maquinado del acero con insertos de carburo de tungsteno, los mecanismos de desgaste tales como la abrasión, la adhesión, la oxidación, la difusión y otros, pueden actuar simultáneamente. Así, bajo unas condiciones de maquinado dadas es difícil la determinación del mecanismo de desgaste principal. No obstante, *Hastings y Oxley* (1976), *Opitz y König* (1967) han planteado que los mecanismos de desgaste predominantes (con su correspondiente velocidad y temperatura) a bajas velocidades y temperaturas de corte es el de abrasión, seguido por la adhesión para moderadas velocidades y temperaturas, y la difusión a elevadas velocidades y temperaturas [9].

Para atenuar los efectos del desgaste de las herramientas en el maquinado se utilizan los fluidos de corte, que influyen esencialmente en la disminución de la temperatura del proceso de corte de metales. El impacto de los fluidos de corte en la salud del operario y en el medio ambiente ha sido ampliamente investigado y en las últimas décadas ha crecido el interés de encontrar alternativas para disminuir o eliminar estos inconvenientes.

En los últimos años ha aumentado el número de investigaciones relacionadas con la evaluación de la vida útil de las herramientas de corte, utilizando diferentes tecnologías de refrigeración, sin embargo, son escasos los estudios en la operación de torneado en seco a elevadas velocidades de corte en los aceros de construcción al carbono, utilizados en la fabricación de elementos de máquinas [10], tal y como se muestra a continuación.

Antecedentes

El desgaste del flanco de los carburos P15 y P25 recubiertos con TiCN/Al₂O₃/TiN y el volumen de material removido durante el cilindrado de desbaste en seco y con fluidos fueron estudiados por Eduardo y Oliveira en 2004, empleando 290 y 350 m/min de velocidad de corte [11]. Por otro lado, Obikawa y otros en 2006, investigaron el desgaste del flanco y de la punta del carburo recubierto con TiC/TiCN/TiN para la operación de ranurado usando la mínima cantidad de fluidos para los valores de 240 y 300 m/min de velocidad de corte [12]. Estos autores utilizaron velocidades de corte moderadas en su análisis.

En su tesis doctoral *Essef* (2006) analizó la fuerza de corte resultante, la temperatura de la viruta y el desgaste del flanco durante la elaboración en seco del acero AISI 1045 y de diferentes aceros AISI 1045 aleados (Pb, Sn, Ca y Bi), con carburo sin recubrimiento utilizando velocidades de corte entre 50 y 400 m/min [13]. *Ariza y Sánchez* (2006), determinaron el desgaste del flanco y la vida útil del carburo recubierto con TiC/Al₂O₃/TiN en el torneado en seco empleando hasta 400 m/min de velocidad de corte [14]. *Gökkaya y Nalbant* (2007), analizaron la rugosidad superficial para diferentes valores de radio del inserto, avance y profundidad durante el maquinado del acero AISI 1030 con carburo recubierto con TiN a una velocidad de corte de 300 m/min [15]. Estos autores utilizaron hasta velocidades de corte moderadas en su análisis.

En su estudio del año 2007, *Tanaka* y otros 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, empleando hasta 500 m/min de velocidad de corte [16]. Estos autores aunque analizaron velocidades de corte intermedias no llegaron a las altas velocidades de corte ni utilizaron carburos recubiertos en su estudio.

Iqbal y colaboradores (2007), investigaron los efectos de la velocidad de corte en el coeficiente de fricción, la longitud de contacto herramienta-viruta, la fuerza de corte tangencial y axial durante la elaboración del acero AISI 1045 con un inserto de carburo sin recubrimiento, utilizando un amplio rango de velocidad desde 198 a 879 m/min [17]. Estos autores, aunque trabajaron en la gama de la alta velocidad no utilizaron carburos recubiertos ni cermet, además no midieron el desgaste de la herramienta de corte.

Lin estudió la fiabilidad de la herramienta de carburo de tungsteno a través del efecto de la velocidad de corte y del avance en el desgaste del flanco y la fuerza de corte durante el torneado en seco del acero AISI 1055 evaluando hasta 550 m/min de velocidad de corte [18]. Este autor aunque analizó velocidades de corte intermedias no llegó a las altas velocidades de corte ni utilizó carburos recubiertos en su estudio.

El efecto de los parámetros de corte en la rugosidad superficial y la potencia consumida en el torneado duro en seco del acero AISI 1045 con el inserto P-1025 recubierto con TiC/TiN utilizando hasta 240 m/min de velocidad de corte, fue realizado por *Bhattacharya* y otros en 2009 [19]. *Özel* y otros (2009), investigaron el efecto del diseño de insertos de carburo *Wiper* y convencionales en la fuerza de corte tangencial y en la rugosidad superficial, durante el cilindrado discontinuo del acero AISI 1045 variando el avance y la velocidad de corte entre 340 y 470 m/min [20]. Estos autores analizaron hasta velocidades de corte moderadas, además no midieron el desgaste de los insertos.

Stanford investigó la influencia de varios métodos de aplicación de los fluidos de corte incluyendo el corte 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 [21]. Este autor utilizó hasta velocidades de corte moderadas en su análisis, además no utilizó carburos recubiertos en su estudio.

Adesta y otros (2009), examinaron el efecto del ángulo de ataque negativo en la vida útil y en el desgaste del flanco de un cermet y en la rugosidad superficial de la pieza maquinada, durante el corte de un acero con 0,44 % de carbono empleando como velocidad de corte los valores de 300 y 1 000 m/min [22]. Estos autores, si bien utilizaron un valor de alta velocidad con un cermet, no consideraron la comparación del desgaste con carburos recubiertos.

En su artículo *Eduardo* y otros (2010), investigaron el efecto de la alta presión del refrigerante en el desgaste de herramientas de carburo recubiertos para velocidades de corte entre 490 y 570 m/min [23]. Estos autores no incluyeron en su investigación altas velocidades de corte ni la comparación de los carburos recubiertos con el cermet.

Del análisis anterior se aprecia que muchos aspectos de este proceso de alto desempeño están siendo investigados aún, pues no todo es conocido, existe poca información sobre el tema en el campo de las vibraciones y el desgaste de las herramientas de corte asociadas al proceso para las elevadas variables de maquinado durante la elaboración de los aceros de construcción al carbono utilizados en la fabricación de elementos de máquinas [10].

Por tanto, el presente trabajo tiene por objetivo el estudio experimental durante el torneado en seco a 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.

La investigación plantea como hipótesis que el tiempo de maquinado y el material de herramienta de corte, tienen un efecto significativo en el desgaste del flanco de los insertos de carburos GC4225 y GC4215 recubiertos y cermet CT5015 sin recubrimiento en el torneado en seco a velocidad de corte intermedia y alta del acero AISI 1045.

Materiales y métodos

Nomenclatura

a (mm)	Profundidad de corte
f (mm/r)	Avance
v (m/min)	Velocidad de corte
T (min)	Tiempo de maquinado
T _{VB} (min)	Tiempo de maquinado de los insertos sin alcanzar el límite de vida útil
r	Coeficiente de correlación
R ²	Coeficiente de determinación
w (μm)	Desgaste del flanco
VB _B (μm)	Criterio de desgaste del flanco

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. Posteriormente, se explica el procedimiento experimental utilizado en la investigación, el cual incluye la caracterización del material de las herramientas de corte y de la pieza utilizada en el estudio. Además, el montaje experimental, el diseño de la investigación y el análisis de los resultados.

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

La vida útil de la herramienta de corte ha sido definida como el tiempo de maquinado transcurrido antes de que falle. Como criterio para definir la vida útil de la herramienta recomendado por ANSI/ASME B94.55M, para herramientas de carburo y de cerámica es de VB_B = 300 μm [24].

En sus artículos del 2005, *Bouzid* [8], *Bouzid* y otros [25], durante el torneado de alta velocidad del acero AISI 4340, plantearon que el criterio de desgaste del flanco empleado ha sido generalmente considerado como una constante independiente de la velocidad de corte. Por ello, definieron el desgaste del flanco experimentalmente en función de la velocidad de corte. Asimismo, Ariza y Sánchez, durante el torneado del acero AISI 1045 utilizando hasta velocidades de corte moderadas adoptaron 190 μm con base en los resultados que obtuvieron [14]. También, las recomendaciones utilizadas en la práctica industrial para limitar el desgaste del flanco para las elaboraciones de acabado es hasta VB_B = 250 μm para los insertos de carburo recubierto y hasta VB_B = 200 μm para los insertos de cerámica [3]. En el presente trabajo, fue asumido como criterio de desgaste del flanco 200 μm, teniendo en cuenta los resultados de la revisión de la literatura científica y que es una elaboración de acabado a intermedia y alta velocidad de corte.

Procedimiento experimental

Antes de llevar a cabo el estudio fue necesario realizar una caracterización del material de la pieza a maquinar y de los insertos utilizados en el corte, lo cual se muestra a continuación.

Material de la pieza

Se empleó 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, pues su composición es ferrito perlítica al 50 %, 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 se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Composición química del material de la probeta

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn
Composición %	0,457	0,152	0,714	0,036	0,006	0,122	98,41	0,024	0,035	0,018	0,001	0,002	0,004	<0,010	0,005

De acuerdo a la norma ANSI/ASME B94.55M [24], el contenido máximo de fósforo debe ser de 0,035 %, por tanto este contenido ligeramente superior, tiene el efecto de disminuir el coeficiente de fricción entre la herramienta de corte y la viruta, por tanto reduce las fuerzas de corte, la temperatura y la formación del borde recreado, proporcionando una mayor vida útil de la herramienta. El contenido del resto de los elementos está dentro de los márgenes preestablecidos.

La microestructura y el tamaño del grano se examinaron sobre toda la sección transversal de la barra en un microscopio óptico *NIKON EPIPHOT*. El tamaño del grano resultó ser fino (8 μm), lo cual afecta negativamente la maquinabilidad pues aumentan las fuerzas de corte para vencer las fuerzas de atracción de los granos. La dureza de la pieza fue medida en un micro durómetro *SHIMADZU*, se obtuvo una dureza promedio de HV 271, y su conversión según la norma ASTM E 140 [26] corresponde con una dureza HRC 26 y HB 258.

Se utilizaron 10 probetas cilíndricas macizas de diámetro 101,6 mm y longitud 304,8 mm que fueron cilindradas hasta un diámetro de 80 mm y refrentadas hasta una longitud de 302 mm para adaptarlas a las condiciones experimentales, además la relación longitud/diámetro se mantuvo inferior a 10, para evitar que ocurran vibraciones durante el mecanizado, lo que está acorde a lo planteado por la norma ANSI/ASME B94.55M [24]. Posteriormente se realizó el centrado por ambas caras de las piezas.

Herramientas de corte

Como insertos con marcación *SANDVIK* fueron empleados el cermet sin recubrimiento CT5015-P10 y los metales duros recubiertos CVD GC4215-P15 y GC4225-P25, en la tabla 3 se indica el resultado del estudio para determinar el tipo y espesor del recubrimiento empleando el microscopio electrónico de barrido marca *JEOL* modelo JSM-6510LV. Del mismo modo, se determinó la composición química de los sustratos de los insertos, que se muestra también en la tabla 2.

La geometría seleccionada para los tres insertos fue CCMT 12 04 04-PF, la cual presenta rompeviruta. Las plaquitas fueron usadas sobre un portaherramientas marca *SANDVIK* de referencia SCLCR/L 2020K 12. Cuando se montaron en el vástago el ángulo de posición principal del filo de corte fue 95°, el ángulo de ataque 0°, el ángulo de incidencia principal 7° y 0° de inclinación de filo de corte. Esta herramienta tiene filos de corte redondeados con un radio de 0,4 mm [27].

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 el buen estado de los bordes cortantes.

Tabla 3. Características de los insertos

Inserto	Recubrimientos				Sustratos				
	Primera capa	Segunda capa	Tercera capa	Espesor (μm)	W	Ti	Co	Nb	Al ₂ O ₃
CT5015	-	-	-	-	20,68	47,20	17,71	8,71	5,7
GC4215	TiN	Al ₂ O ₃	Ti(N,C)	15	96,19	1,44	2,38	-	-
GC4225	Ti(C,N)	Al ₂ O ₃	-	10	94,77	2,10	3,13	-	-

Con ayuda del 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 [24].

Asimismo, fue medida la dureza de los insertos en cinco puntos diferentes en la superficie de ataque en un micro durómetro *SHIMADZU*, y se obtuvo como valores promedios: 2 046 HV para el inserto CT5015, 1 631 HV para el inserto GC4215 y para el inserto GC4225 1 789 HV.

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 r/min, el diámetro máximo a elaborar sobre el carro lateral es de 198 mm y la longitud máxima a maquinar es de 775 mm.

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 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/r) se mantuvieron constantes durante todas las pruebas. En la tabla 4 aparecen las variables estudiadas.

Tabla 4. Variables consideradas en el estudio

Variable	Tipo de variable	Medida
Desgaste de la herramienta	Dependiente	Desgaste del flanco (μm)
Material de la herramienta	Independiente	Carburos recubiertos GC4215 (P15 según ISO) y GC4225 (P25 según ISO), y cermet sin recubrimiento CT5015 (P10 según ISO)
Velocidad de corte	Independiente	500 y 600 m/min
Tiempo de maquinado	Independiente	Tiempo de maquinado (min). Cinco mediciones (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 experimentos fueron conducidos empleando tres niveles de material de herramienta, dos niveles de velocidad 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 60 mediciones. Se realizaron corridas pilotos para comprobar todas las condiciones de experimentación, equipos de medición, máquina herramienta, herramienta de corte.

Los parámetros de corte seleccionados están en correspondencia con las recomendaciones del fabricante de las plaquitas, excepto cuando se utilizan 500 y 600 m/min de velocidad de corte pues estos valores están por encima del límite establecido, los cuales se manipularon para evaluar el comportamiento de los insertos a estos niveles de velocidad. Además, se debe señalar que se recomienda utilizar refrigerante y para un acero de contenido medio de carbono de 150 HB de dureza, sin embargo en este estudio el corte es en seco y la dureza de la pieza es superior (HB 258).

Se utilizaron los dos filos de corte de cada inserto que proporciona la misma cara. Se cilindró la pieza, comenzando con un filo nuevo, el corte fue interrumpido cada cierto tiempo para medir el ancho de desgaste del flanco utilizando un microscopio electrónico de barrido marca JEOL. La medición del desgaste fue realizada teniendo en cuenta la norma ANSI/ASME B94.55M [24]. Se emplearon varias piezas de acero AISI 1045 para evitar cualquier efecto de confusión entre las piezas. La selección de las probetas y de los insertos, así como la ejecución de los experimentos fue completamente aleatoria.

Resultados y discusión

El objetivo fundamental de este trabajo es evaluar el comportamiento en función del tiempo del desgaste del flanco de los tres insertos para las dos velocidades de corte.

En la figura 2 se muestra la medición del desgaste del flanco de los insertos para 500 m/min y 600 m/min de velocidad de corte, para 5 y 4 min de tiempo de maquinado respectivamente. Se observa que para $v = 500$ m/min los insertos CT5015 y GC4225 exceden el criterio de desgaste del flanco ($200 \mu\text{m}$) antes de llegar al tiempo final de maquinado (5 min), mientras que el inserto GC4215 no llega al mismo.

Para $v = 600$ m/min y $T = 4$ min los insertos CT5015 y GC4225 sufren un desgaste catastrófico sobrepasando con creces el criterio de desgaste del flanco, mientras el inserto GC4215 aunque supera levemente también dicho límite consigue el mejor desempeño.

Según *J. Kopač* y *M. Sokovič* [28] el aumento de la velocidad de corte provoca un aumento significativo de la temperatura de corte. Por tanto, la manifestación del desgaste termoquímico se hace más evidente, especialmente cuando las velocidades utilizadas están en el rango de la alta velocidad. En este caso la temperatura del borde cortante puede llegar a $1\ 000$ °C o más, lo cual favorece los procesos de difusión y oxidación [9], [28]. Además, la dureza del material de la herramienta de corte disminuye a elevadas temperaturas de corte, favoreciendo el desgaste abrasivo. Para herramientas de carburo, las altas temperaturas de corte estimulan también la difusión, adhesión, la deformación plástica y otros [29] [30] [31].

Por otro lado, durante el maquinado en seco, el filo de corte está sometido a elevados valores de cargas térmicas y esfuerzos mecánicos [32].

Para la velocidad de corte intermedia la plaquita CT5015 (figura 2) presenta abrasión, adhesión, micro fractura y muesca. Los insertos GC4215 y GC4225 muestran abrasión, adhesión seguida de deformación plástica y micro fractura.

Para la alta velocidad de corte el inserto CT5015 (figura 2) presenta un excesivo desgaste revelando abrasión, adhesión, deformación plástica y astillado. La plaquita GC4225 manifiesta significativa abrasión, adhesión, deformación plástica y fractura del borde cortante, mientras que el inserto GC4215 muestra abrasión, adhesión seguida de deformación plástica y astillado.

Luego, se considera que el comportamiento del desgaste del flanco de los insertos para las velocidades de corte ensayadas está sustentado fundamentalmente por la difusión, planteamiento que se apoya en el estudio de *Molinari y Nouari* [33]. Finalmente, se supone que los principales mecanismos de desgaste son la abrasión, adhesión y difusión, conclusión similar a la obtenida por *Dolinšek* y colaboradores [28], *Essel* [13], y *Thamizhmanii y Hasan* [34].

En la figura 3a se muestra la evolución del desgaste del flanco de los insertos para $v = 500$ m/min , se aprecia un mejor comportamiento del inserto GC4215, le siguió el inserto GC4225 y el peor resultado fue para el inserto CT5015, estos dos últimos llegaron al límite del criterio de fin de vida establecido mucho antes del tiempo de maquinado final (cinco minutos), en comparación con el inserto GC4215 que no llegó al límite.

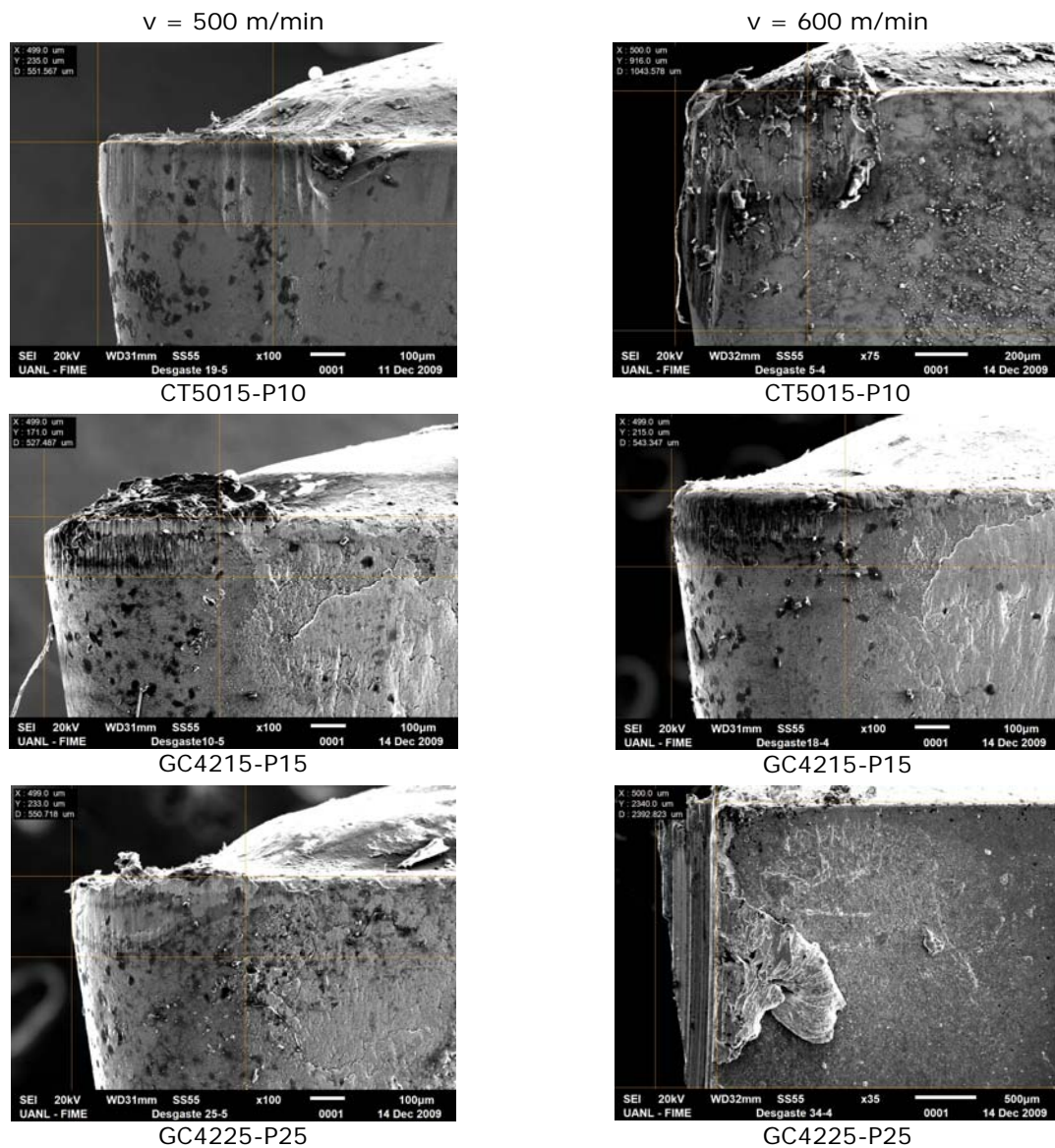


Fig. 2. Desgaste del flanco de los insertos para $v = 500$ m/min y $v = 600$ m/min para un tiempo de maquinado de 5 min y 4 min respectivamente

Para la velocidad de corte de 600 m/min (figura 1b) el mejor desempeño fue también para el inserto GC4215, en cambio los filos de corte de los insertos GC4225 y CT5015 se desmoronaron antes de llegar al tiempo final de maquinado. El inserto CT5015 tuvo un mejor desempeño que el inserto GC4225.

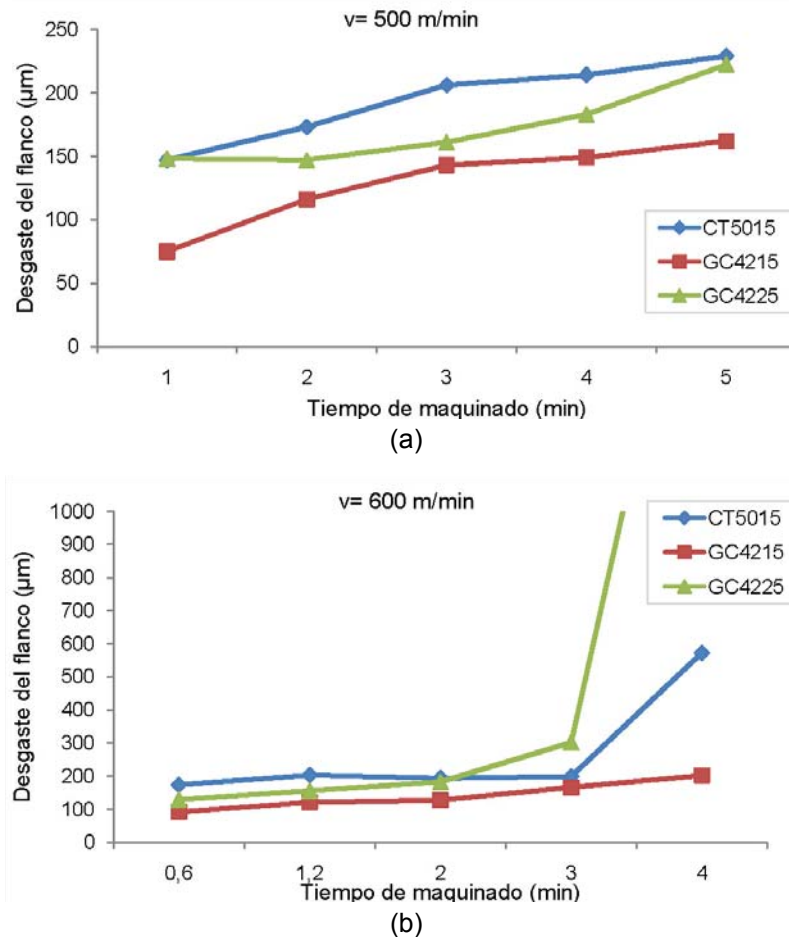


Fig. 3. Evolución del desgaste del flanco de los insertos (a) para 500 m/min y (b) 600 m/min de velocidad de corte

Se observó que una de las herramientas de mayor desgaste (CT5015), es coincidentemente la de mayor dureza, debido a que la misma no presenta recubrimientos que la protejan durante el proceso de corte.

Además, se apreció un cambio de comportamiento del inserto GC4225 al aumentar la velocidad de corte, lo cual puede estar motivado a que el mismo pierde sus recubrimientos y por tanto el substrato queda desprotegido, de esta forma el carburo disminuye su resistencia al rojo y a la oxidación, asimismo aumenta su afinidad con el material de la probeta (ver Figura 1), creciendo sustancialmente el desgaste.

El inserto GC4215 presentó el mejor desempeño en cuanto al desgaste del flanco, lo que está motivado a que el mismo tiene tres capas de recubrimientos. La capa exterior (TiNC) le proporciona tenacidad y resistencia al desgaste abrasivo, por tanto, una mejor resistencia al desgaste del flanco, la capa de recubrimiento de Al_2O_3 le aporta sobre todo el efecto de barrera térmica, y el recubrimiento TiN le suministra un bajo coeficiente de fricción, tenacidad, efecto de barrera térmica y habilidad de adhesión al substrato (ver tabla 1). Por todo lo anterior, esta plaquita está en mejores condiciones de enfrentar las severas circunstancias del maquinado de alta velocidad.

Se realizó el análisis de varianza factorial para determinar si los factores tiempo de maquinado e inserto, así como la interacción de los mismos tienen un efecto estadísticamente significativo en el desgaste del flanco de los insertos, además del análisis de regresión lineal simple, utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XV versión 15.2.14.

Análisis de varianza factorial y de regresión lineal simple

Los resultados del análisis de varianza para $v = 500$ m/min son los siguientes:

En la tabla 5 se muestran los resultados de la comparación. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los p-valores (probabilidad de F) comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que los p-valores son inferiores a 0,05 el tipo de inserto y el tiempo de maquinado tienen un efecto estadísticamente significativo en el desgaste para un nivel de confianza del 95,0 %. Sin embargo, para dicho nivel de confianza la interacción de estas dos variables no tiene un efecto tan significativo pues su valor p (0,156) es superior a 0,05. Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla 5. Análisis de varianza factorial de desgaste del flanco de los tres insertos para $v = 500$ m/min .

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	Cociente-F	p-valor
Inserto	21 923,5	2	10 961,7	67,11	0,000
Tiempo de maquinado	24 980,0	4	6 245,0	38,23	0,000
Inserto-Tiempo	2 343,2	8	292,9	1,79	0,156
Residuos	2 450,0	15	163,3		
Total (corregido)	51 696,7	29			

Fue aplicado un procedimiento de comparación múltiple para determinar si al menos una de las medias de desgaste del flanco de los insertos son diferentes unas de otras. El método utilizado para discernir entre las medias fue el de las menores diferencias significativas de *Fisher*. Ningún grupo resultó homogéneo. La diferencia estimada entre cada par de medias muestra que entre el desgaste del flanco de los tres insertos existe una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95,0 %.

Además, fue realizado el análisis de regresión lineal 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 el que presentó el mayor coeficiente de determinación (R^2) con respecto a los demás modelos curvilíneos alternativos. El coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste. En la tabla 6 se muestran los modelos, la ecuación, el coeficiente de determinación y de correlación, así como el tiempo de maquinado sin llegar al límite de desgaste establecido de los tres insertos, para 500 m/min de velocidad de corte.

Tabla 6. Análisis de regresión lineal simple del desgaste del flanco de los insertos para $v = 500$ m/min

Inserto	Ecuación del modelo ajustado	R^2 (%)	r	T_{VB} (min)
CT5015	$w = 145,563 \cdot T^{0,2832}$	83,15	0,91	4,85
GC4215	$w = 77,3125 + 53,9818 \cdot \ln(T)$	93,63	0,96	9,70
GC4225	$w = 158,6 - 18,4429 \cdot T + 6,3571 \cdot T^2$	97,05	0,98	4,38

El coeficiente de correlación indica una relación muy fuerte entre desgaste del flanco de los insertos y el tiempo de maquinado. Para los tres casos el p-valor de la tabla ANOVA es inferior a 0,05, lo que significa que existe relación estadísticamente significativa entre desgaste y tiempo para un nivel de confianza del 95 %. A partir de las ecuaciones de la tabla 5 se determina que el tiempo de maquinado tuvo un mayor efecto en el desgaste del flanco para el inserto GC4215, le sigue el inserto CT5015 y por último el inserto GC4225. Los insertos GC4215 y GC4225 presentaron un mejor desempeño 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 para $v = 500$ m/min .

La comparación en el análisis de la varianza del desgaste del flanco de los tres insertos para $v = 600$ m/min muestra que los p-valores son inferiores a 0,05 por lo que el tipo de inserto, el tiempo de maquinado y la interacción de estas dos variables tienen un efecto estadísticamente significativo en el desgaste del flanco para un nivel de confianza del 95,0 %.

La aplicación del procedimiento de comparación múltiple refleja que los grupos GC4215 - CT5015 y CT5015 - GC4225 son homogéneos. La diferencia estimada entre cada par de medias, muestra que el par GC4215 - GC4225 presenta diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95,0 %. 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 exponen en la tabla 7.

Tabla 7. Análisis de regresión lineal simple del desgaste del flanco de los insertos para $v = 600$ m/min .

Inserto	Ecuación del modelo ajustado	R^2 (%)	r	T_{VB} (min)
CT5015	$w = \frac{1}{(0,0063 \cdot \sqrt{T} - 0,0006 \cdot T^2)}$	78,80	-88,76	3,25
GC4215	$w = (9,0124 + 1,2891 \cdot T)^2$	94,47	0,97	3,97
GC4225	$w = \frac{1}{(0,0074 - 0,0004 \times T^2)}$	97,24	-0,98	2,45

El coeficiente de correlación igual a -88,76 para el inserto CT5015, indica una relación fuerte entre el desgaste y el tiempo. Sin embargo, para los insertos GC4215 y GC4225 indica una relación muy fuerte entre las variables. Para los tres casos el p-valor de la tabla ANOVA es inferior a 0,05, es decir, existe una relación estadísticamente significativa entre desgaste y tiempo de maquinado para un nivel de confianza del 95 %.

A partir de las ecuaciones de la tabla 6 se determina que el tiempo de maquinado en alta velocidad de corte (600 m/min) tuvo un mayor efecto en el desgaste del flanco para el inserto GC4225, le sigue el inserto GC4215 y por último el inserto CT5015. El inserto GC4215 presentó el mejor desempeño en el desgaste del flanco, lo cual se debe a que posee tres recubrimientos lo protegieron durante el proceso de corte.

Según el suministrador de los insertos [27], estos tienen una vida útil de 15 min para un límite de $v = 400$ m/min, sin embargo, el estudio permitió determinar el tiempo de maquinado de los mismos para las condiciones extremas de corte.

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 CT5015 y GC4225 para la velocidad de corte intermedia y para los insertos GC4225 y CT5015 utilizando una alta velocidad. Los resultados del estudio exhiben un mejor desempeño en el torneado en seco para la velocidad de corte moderada y alta, para el carburo GC4215 recubierto con tres capas. Lo cual se debe a que la capa exterior (TiNC) le proporciona tenacidad y resistencia al desgaste abrasivo, por tanto, una mejor resistencia al desgaste del flanco, la capa de Al_2O_3 le aporta sobre todo el efecto de barrera térmica, y el recubrimiento TiN le suministra un bajo coeficiente de fricción, tenacidad, efecto de barrera térmica y buena adhesión al sustrato. Por todo lo anterior, esta plaquita estuvo en mejores condiciones de enfrentar las severas circunstancias del maquinado de alta velocidad.

-El análisis de varianza factorial para la velocidad de corte intermedia demostró que los factores material de inserto y tiempo de maquinado tienen un efecto estadísticamente significativo en el desgaste del flanco para un nivel de confianza del 95,0 %. Sin embargo, la interacción de estos dos factores no tienen un efecto tan significativo. Mientras que para la alta velocidad de corte las variables y su interacción presentaron un efecto estadísticamente significativo.

-El análisis de varianza factorial de desgaste del flanco para la velocidad de corte intermedia mostró que existe diferencia estadísticamente significativa al comparar los valores medios de desgaste para los tres niveles de herramienta de corte. Sin embargo, para el maquinado con alta velocidad resultaron homogéneos los grupos GC4215 - CT5015 y CT5015 - GC4225.

-Según las ecuaciones obtenidas por regresión lineal simple para las condiciones de elaboración dadas, se recomienda: (a) cuando se utiliza una velocidad de corte intermedia con el inserto CT5015 se puede maquinar hasta un tiempo de 4,85 min; para el inserto GC4225 hasta 4,38 min y hasta 9,7 min para el inserto GC4215, sin llegar al límite del criterio de desgaste del flanco; y (b) cuando se utiliza una velocidad de corte alta se puede maquinar con el inserto CT5015 hasta 3,25 min; para el inserto GC4225 hasta 2,45 min y hasta 3,97 min para el inserto GC4215.

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 a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica 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.

Referencias

1. Martínez, F., Sánchez, T., *et al.* "Comportamiento del acabado superficial de la pieza y el desgaste de la herramienta al fresar aluminio con altas velocidades de corte en fresadoras CNC convencionales". *Ingeniería Mecánica*. 2006, vol. 9, n° 2, p. 7-12. [Consultado el: 20 de junio 2009]. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/152/486>. ISSN 1815-5944.
2. Grzesik, W. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications*. 1st ed. Poland: Elsevier Science, p. 213-226. ISBN 978-0-08-044534-2.
3. Astakhov, V.P. y Davim J.P. *Machining. Fundamentals and Recent Advances*. 1st ed. London: Springer-Verlag. 2008, p. 37-52. ISBN 978-1-84800-212-8.
4. Smith, G. *Cutting Tool Technology*. 1st ed. London: Springer-Verlag. 2008, p. 2-30. ISBN 978-1-84800-204-3.
5. Astakhov, V.P. *Tribology of Metal Cutting*. 1st ed. London: Elsevier. 2006, p. 220-273. ISBN 10 0-444-52881-4.
6. Choudhury, I. A. y Elbaradie, M. A. "Machinability assessment of inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology". *Journal of Manufacturing Processing Technology*. 1999, vol. 95, n° 1, p. 30-39. ISSN 0924-0136. DOI 10.1016/S0924-0136(99)00085-0.
7. Hertzsch, A., Kröger, K. y Truckenbrodt, H. "Microtopographic analysis of turned surfaces by model-based scatterometry". *Journal of the International Society for Precision Engineering and Nanotechnology*. 2002, vol. 26, n° 3, p. 306-313. ISSN 0141-6359. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-6359\(02\)00116-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-6359(02)00116-2).
8. Bouzid, W. "An investigation of tool wear in high-speed turning of AISI 4340 steel". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005, vol. 26, n° 4, p. 330-334. ISSN 1433-3015. DOI 10.1007/s00170-003-1991-5.
9. Arsecularatne, J. A., Zhang, L. C. y Montross, C. "Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, vol. 46, n° 2, p. 482-491. ISSN 0890-6955. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2005.07.015.
10. Hernández, L. W., Pérez, R., *et al.* "Caracterización del proceso de maquinado de alta velocidad de los aceros termomejorables". En: *IV Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín*. Holguín, Cuba. 2009. p. 41-50. [CD-ROM]. ISBN 978-959-16-1010-2.
11. Eduardo, A. y Oliveira, A. "Optimizing the use of dry cutting in rough turning steel operations". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2004, vol. 44, n° 10, p. 1061-1067. ISSN 0890-6955. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2004.03.001.
12. [12] Obikawa, T., Kamata, Y. y Shinozuka, J. "High-speed grooving with applying MQL". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, vol. 46, n° 14, p. 1854-1861. ISSN 0890-6955. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2005.11.007.
13. Essel, I. "Machinability Enhancement of Non-Leaded Free Cutting Steels". Tesis Doctoral, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen, Alemania. 2006. [Consultado el: 20 de junio 2009]. Disponible en: http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus/volltexte/2006/1576/pdf/Essel_Ingo.pdf.
14. Ariza, L. y Sánchez, C. "Diseño y desarrollo de ensayos para determinar la vida en insertos intercambiables de corte bajo criterio de desgaste de flanco en procesos de torneado". Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2006.
15. Gökkaya, H., y Nalbant, M. "The effects of cutting tool geometry and processing parameters on the surface roughness of AISI 1030 steel". *Materials & Design*. 2007, vol. 28, n° 2, p. 717-721. ISSN 0264-1275. DOI 10.1016/j.matdes.2005.09.013.
16. Tanaka, R., Yamane, Y. *et al.* "Machinability of BN free-machining steel in turning". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007, vol. 47, n° 12-13, p. 1971-1977. ISSN 0890-6955. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2007.02.003.

17. Iqbal, S., Mativenga, P. T. *et al.* "Characterization of machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds. Part 1: Investigation of contact phenomena". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B. Journal of Engineering Manufacture*. 2007, vol. 221, n° 5, p. 909-916. ISSN 2041-2975. DOI 10.1243/09544054JEM796.
18. Lin, W. S. "The reliability analysis of cutting tools in the HSM processes". *Archives of Materials Science and Engineering*. 2008, vol. 30, n° 2, p. 97-100. ISSN 18972764.
19. Bhattacharya, A., Das, S. *et al.* "Estimating the effect of cutting parameters on surface finish and power consumption during high speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA". *Production Engineering*. 2009, vol. 3, n° 1, p. 31-40. ISSN 1863-7353. DOI 10.1007/s11740-008-0132-2.
20. Özel, T., Esteves, A. *et al.* "Neural network process modelling for turning of steel parts using conventional and wiper inserts". *International Journal of Materials and Product Technology*. 2009, vol. 35, n° 1/2, p. 246-258. ISSN 1741-5209. DOI 10.1504/IJMPT.2009.025230.
21. Stanford, M., Lister, P.M. *et al.* "Investigation into the use of gaseous and liquid nitrogen as a cutting fluid when turning BS 970-80A15 (En32b) plain carbon steel using WC-Co uncoated tooling". *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, vol. 209, n° 2, p. 961-972. ISSN 0924-0136. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.003.
22. Adesta, E., Riza, M. *et al.* "Tool wear and surface finish investigation in high speed turning using cermet insert by applying negative rake angles". *European Journal of Scientific Research*. 2009, vol. 38, n° 2, p. 180-188. ISSN 1450-216X. DOI <http://irep.iium.edu.my/id/eprint/5634>.
23. Eduardo, A., Micaroni R., *et al.* "Evaluating the effect of coolant pressure and flow rate on tool wear and tool life in the steel turning operation". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, vol. 50, n° 9-12, p. 1125-1133. ISSN 1433-3015. DOI 10.1007/s00170-010-2570-1.
24. ANSI/ASME. Tool-life testing with single-point turning tools. ANSI/ASME B94.55M. New York, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 1985.
25. Bouzid, W., Zghal, A., *et al.* Carbide and ceramic tool life in high speed turning. *International Journal of Vehicle Design*, 2005, vol. 39, n° 1/2, p. 140-153. ISSN 1741-5314. DOI 10.1504/IJVD.2005.007225.
26. ASTM. Standard hardness conversion tables for metals. ASTM E 140. P.A., USA: American Society for Testing Materials, 2000.
27. SANDVIK COROMANT. *Torneado General*. SANDVIK COROMANT, 2009, [Consultado el: 24 de julio del 2009], Disponible en: http://www.sandvikcoromant.mx.com/MC_2009_Klick_SPA_A.pdf.
28. Dolinšek, S., Šuštaršič, B., *et al.* "Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes". *Wear*. 2001, vol. 250, n° 1-12, 2001, p. 349-356. ISSN 0043-1648. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00620-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00620-2).
29. Adesta, E., Al Hazza, M., *et al.* "Tool life estimation model based on simulated flank wear during high speed hard turning". *European Journal of Scientific Research*. 2010, vol. 39, n° 2, p. 265-278. ISSN 1450-216X. DOI <http://irep.iium.edu.my/id/eprint/5634>.
30. Bosheh, S., y Mativenga, P. T. "White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, vol. 46, n° 2, p. 225-233. ISSN 0890-6955. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.009.
31. Liu, Z., Ai, X., *et al.* "Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling". *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol. 129, p. 222-226. ISSN 0924-0136. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00605-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00605-2).
32. Chakraborty, P., "Tool life and flank wear modelling of physical vapour deposited TiAlN/TiN multilayer coated carbide inserts when end milling 4340 steel under dry and semi-dry cutting conditions". Tesis Doctoral, University of Miami, Miami, U.S.A. 2007. [Consultado el: 18 de junio 2009] Disponible en: <http://edt.library.miami.edu/theses/available/edt-11272007-160423/>.
33. Molinari, A., y Nouari, M., "Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting". *Wear*. 2002, vol. 252, p. 135-149. ISSN 00431648. DOI [10.1016/S0043-1648\(01\)00858-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00858-4).
34. Thamizhmanii, S., y Hasan, S., "Investigation of surface roughness and flank wear by CBN and PCBN tools on hard Cr-Mo steel". En: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. I, London, U.K., 2009. ISBN 978-988-17012-5-1.