

Estudio del rendimiento del torneado de alta velocidad utilizando el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante^(*)

L.W. Hernández-González*, R. Pérez-Rodríguez*, P.C. Zambrano-Robledo**,
H.R. Siller-Carrillo*** y H. Toscano-Reyes***

Resumen

En este trabajo se aborda el estudio experimental de la evolución de la fuerza de corte resultante de dos insertos de carburo recubierto y un cermet, durante el torneado en seco del acero AISI 1045 con velocidades de corte de 400, 500 y 600 m/min. Se introduce, además, un nuevo criterio para el estudio del rendimiento de las operaciones de mecanizado: el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte. La investigación mostró un mejor rendimiento del cermet para la velocidad de corte moderada e intermedia, mientras que para la alta velocidad de corte y tiempo final de mecanizado, el mejor resultado fue para el carburo recubierto con tres capas. El análisis de varianza factorial demostró un efecto significativo del tiempo de mecanizado en el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante, mientras que la variable material del inserto y su interacción, fue solo significativa para la velocidad de corte intermedia.

Palabras clave

Fuerza de corte resultante; Torneado de alta velocidad; Acero AISI 1045; Análisis de varianza factorial.

Study of performance of high speed turning using the volumetric dimension coefficient of resultant cutting force

Abstract

This work deals with the experimental study of the resultant cutting force evolution of two coating carbide and a cermet inserts, during the dry turning of AISI 1045 steel with 400, 500 and 600 m/min cutting speeds. A new criterion for machinability study, the coefficient of volumetric dimension of cutting force, it is introduced. The investigation showed a better performance of cermet for moderate and intermediate cutting speeds, while at high cutting speed and final machining time, the three layers coated carbide achieved the best result. The factorial analysis of variance demonstrated a significant effect of machining time on the coefficient of volumetric dimension of resultant cutting force, while the material insert factor and their interaction, for intermediate cutting speed was just significant.

Keywords

Resultant cutting force; High speed turning; AISI 1045 steel; Analysis of factorial variance.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de componentes mecánicos de alta calidad, gran exactitud y menores tiempos de entrega para sistemas de elevado rendimiento, ha aumentando considerablemente en los últimos años a nivel mundial. Este hecho ha propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a los procesos de mecanizado. El desarrollo integral de las máquinas herramienta,

de las herramientas de corte y de las tecnologías de fabricación ha posibilitado la aplicación del corte de metales con altas velocidades, siendo ésta 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, aplicado a partir de la década de los años 90, existen muchas cuestiones tecnológicas que aún están sin respuesta^[1].

(*) Trabajo recibido el día 13 de mayo de 2012 y aceptado en su forma final el día 12 de febrero de 2013.

* Universidad de Holguín, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Av. XX Aniversario s/n, GP 57, 80100, Holguín, Cuba, E-mail: wilfredo@facing.uho.edu.cu, roberto.perez@facing.uho.edu.cu.

** Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Av. Pedro de Alba s/n, Ciudad Universitaria, 66451, Nuevo León, México, E-mail: patricia.zambrano@uanl.mx.

*** Centro de Innovación en Diseño y Tecnología, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada n.º 2501 Sur, Monterrey, Nuevo León, México, E-mail: hector.siller@itesm.mx.

Desde el punto de vista histórico, la idea del mecanizado de alta velocidad se le atribuye al ingeniero alemán C. Salomon, en 1931. Sus estudios indicaron que para velocidades de corte de 5 a 10 veces superiores a las velocidades convencionales, la temperatura de la viruta cortada (interfase viruta-herramienta) comienza a descender. Desafortunadamente, hasta ahora, esta teoría no ha sido verificada^[2]. Por su parte, Longbottom y Lanham plantearon que la hipótesis de Salomon no parece válida para la temperatura de la interfase pieza-herramienta de corte, pero podría ser aceptada para la temperatura de la pieza^[3].

La teoría clásica plantea que la cantidad de calor generado en el proceso de corte se distribuye entre la viruta (50 % a 86 %), la herramienta de corte (10 % a 40 %), la pieza (3 % a 9 %) y el medio circundante (1 %) ^[4]. Según Shaw (1996) alrededor del 90 % del calor generado pasa a la viruta, 5 % a la pieza y 5 % a la herramienta. Otros estudios de Anon (1994) y Luer (2003) indican que el 80 % del calor generado pasa a la viruta, 10 % a la pieza y 10 % a la herramienta de corte^[3].

El estudio experimental de Quan *et al.*^[5], reveló la distribución del calor en la operación de torneado del acero AISI 1045 con inserto de carburo no recubierto, para velocidades de corte moderadas y altas. En el mismo se confirmó que el aumento de la velocidad de corte provoca un incremento de la cantidad de calor que fluye hacia a la viruta, mientras que disminuye para la pieza y la herramienta de corte (Fig. 1) aunque, como es lógico, es superior la cantidad de calor generado en comparación con el mecanizado a velocidad de corte convencional.

El mecanizado 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 académico e industrial. La influencia del HSC en el rendimiento del mecanizado está dada en permitir un alto valor de metal eliminado y buena calidad de la superficie de la pieza maquinada, disminuyendo al mismo tiempo las fuerzas de corte y la vida útil de la herramienta. Esto implica necesariamente materiales de corte avanzados para compensar la reducción de la vida útil de la herramienta^[2]. 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. En el 2006, el 50 % de los aceros de corte rápido, el 85 % de los carburos y el 40 % de los materiales superduros para herramientas, utilizados en la industria eran recubiertos^[6]. Estudios más recientes (2008), revelan que el 80 % de todas las operaciones de mecanizado son realizadas con herramientas de corte recubiertas^[7].

Los recubrimientos: (a) aumentan la dureza superficial para una mayor resistencia al desgaste, (b) incrementan la resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo, del flanco o del cráter, (c) reducen el coeficiente de fricción, lo que facilita el deslizamiento de la viruta, disminuyen las fuerzas de corte, evitan la adhesión en las superficies de contacto, reducen el calor generado debido al deslizamiento de la viruta, (d) reducen la cantidad de energía térmica que fluye a la herramienta, (e) incrementan la resistencia a la oxidación y corrosión y (f) mejoran la calidad de la superficie maquinada^[8].

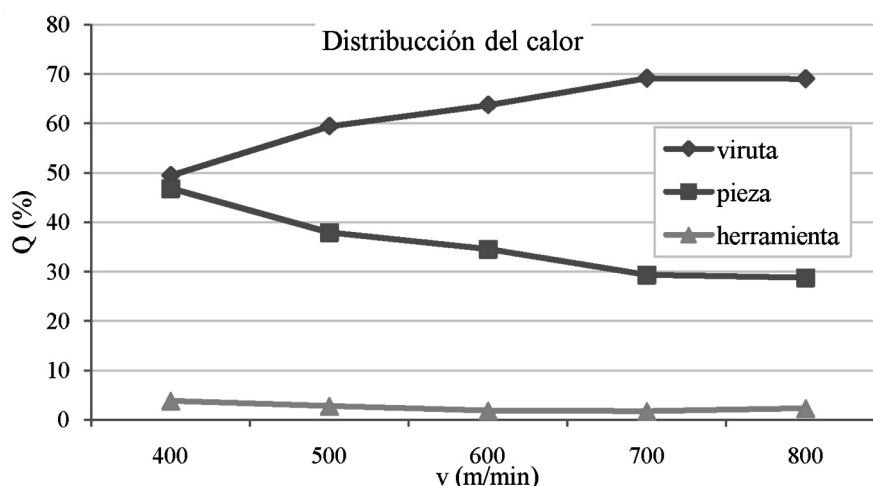


Figura 1. Distribución del calor entre la viruta, la pieza y la herramienta, en función de la velocidad de corte^[5].

Figure 1. Heat distribution among chip, workpiece and cutting tool, for different cutting speeds^[5].

En el año 2008, Astakhov y Xiao^[9], así como Long^[10], plantearon que las fuerzas de corte son uno de los parámetros de estudio del corte de metales más importante.

Las tensiones producidas durante el mecanizado, las cuales tienden a deformar la máquina herramienta, la herramienta de corte y la pieza, son provocadas usualmente por los factores siguientes:

- Cargas estáticas que incluyen el peso de la máquina y sus diferentes piezas.
- Cargas dinámicas que son inducidas por el movimiento de rotación o recíprocante de la pieza o de la herramienta de corte.
- Las fuerzas de corte generadas por el proceso de elaboración del material.

Ambas cargas, las estáticas y las dinámicas, afectan al rendimiento del proceso de mecanizado, especialmente en las elaboraciones de acabado, mientras que la deflexión provocada por las fuerzas de corte disminuye la exactitud de elaboración^[11].

Las fuerzas de corte son un parámetro multifactorial, es decir, depende de muchos elementos, entre los que se destacan: a) propiedades físico-mecánicas del material de la pieza y de la herramienta de corte, b) elementos geométricos de la herramienta, c) parámetros del régimen de corte (velocidad, avance y profundidad de corte), d) fluidos de corte, e) desgaste de la herramienta y f) rigidez del sistema tecnológico (máquina herramienta-pieza-herramienta de corte).

La temperatura de corte es un factor importante en las operaciones de mecanizado debido a su gran influencia en las fuerzas de corte, vida útil de la herramienta e integridad de la superficie maquinada. Mayores temperaturas de corte disminuyen la resistencia del material de la pieza, haciéndolo más dúctil. Esto provoca una disminución de las fuerzas de corte y por tanto, mejora su maquinabilidad. Sin embargo, la vida útil de la herramienta es afectada por el aumento de la temperatura^[12].

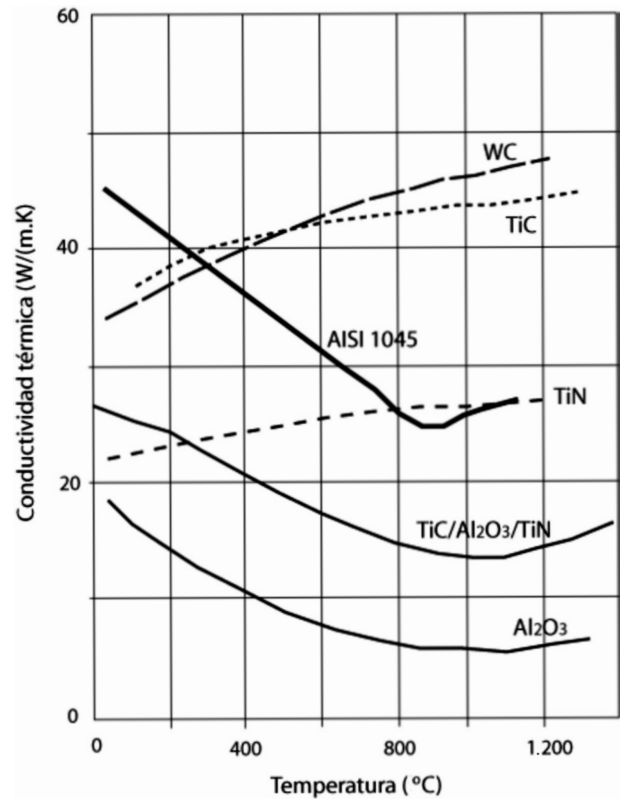


Figura 2. Conductividad térmica de materiales de herramienta de corte (sustrato, recubrimiento) y de la pieza versus temperatura^[13].

Figure 2. Thermal conductivity of cutting tool (substrate, coatings) and workpiece materials versus temperature^[13].

En la figura 2 se muestra la conductividad térmica de materiales de herramientas de corte (sustrato, recubrimiento) y de la pieza, en función de la temperatura. En la tabla I se comparan las propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste de algunos de los recubrimientos de herramientas de corte.

Tabla I. Comparación de propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste de algunos de los recubrimientos de herramientas de corte^[14]

Table I. Comparison of mechanical properties and wear resistant of some cutting tool coatings^[14]

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	+	++	+	++	+	++

En los últimos años ha aumentado el número de investigaciones relacionadas con la evaluación de las fuerzas 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.

Noordin *et al.* (2004) investigaron el efecto de la velocidad de corte (240, 300 y 375 m/min) y del avance en la fuerza de corte tangencial y la rugosidad superficial, durante el torneado con un carburo recubierto con TiCN/Al₂O₃/TiN^[15]. Estos autores no incluyeron velocidades de corte superiores en su estudio.

Outeiro y Astakhov (2005) analizaron el efecto del afilado relativo de la herramienta en la temperatura durante el torneado en seco del acero AISI 1045 con carburos recubiertos y no recubiertos, variando el avance, la profundidad y la velocidad de corte (75-200 m/min)^[16]. Estos autores no midieron las fuerzas de corte ni utilizaron velocidades de corte superiores en su artículo.

En su tesis doctoral Essel (2006), investigó 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 (plomo, estaño, calcio y bismuto), con carburo sin recubrimiento utilizando velocidades de corte entre 50 y 400 m/min^[17]. Este autor utilizó hasta velocidades de corte moderadas en su estudio.

Iqbal *et al.* (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^[18]. Estos autores, aunque trabajaron en la gama de la alta velocidad no utilizaron carburos recubiertos ni cermet.

En ese mismo año, Tanaka *et al.*, evaluaron las fuerzas de corte axial, radial y tangencial, el desgaste del flanco, el desgaste máximo del cráter, y la temperatura para varios carburos y cermet sin recubrimiento durante la elaboración en seco de varios aceros de maquinabilidad mejorada (incluyendo el acero AISI 1045 como referencia), utilizando hasta 500 m/min de velocidad de corte^[19]. Estos autores no llegaron a las altas velocidades de corte, ni utilizaron carburos recubiertos en su artículo.

El efecto de la velocidad de corte (80 a 300 m/min) y del avance en la rugosidad superficial durante el cilindrado en seco del acero AISI 1045 con varios carburos recubiertos fue investigado por Tawfiq (2008)^[20]. Este autor utilizó hasta velocidad de corte moderada en su análisis, además no midió las fuerzas de corte.

Quan *et al.* (2008) determinaron la potencia de corte y el flujo de calor durante el torneado del acero AISI 1045 con el carburo P10 sin recubrimiento, variando la velocidad de corte de 400 a 800 m/min^[5]. Estos autores, aunque trabajaron en la gama de la alta velocidad no utilizaron carburos recubiertos ni cermet, además no midieron las fuerzas de corte.

Luego, en 2009, Iqbal *et al.*, analizaron la longitud de contacto herramienta-viruta y el valor de la compresión de la viruta durante el cilindrado del acero AISI 1045 y de la aleación Ti6Al4V con un inserto de carburo sin recubrimiento, utilizando un amplio rango de velocidad desde 198 a 879 m/min^[21]. Al igual que en el caso anterior estos autores, aunque trabajaron en la gama de la alta velocidad no utilizaron carburos recubiertos ni cermet, además no midieron las fuerzas de corte.

Tangjitsitcharoen (2009) investigó el desgaste del flanco de un carburo recubierto, las fuerzas de corte axial, radial y tangencial y la rugosidad superficial durante el torneado en seco del acero AISI 1045, con refrigerante y con diferentes parámetros de mínima cantidad de fluidos, utilizando hasta 350 m/min de velocidad de corte^[22]. En ese mismo año, SreeramaReddy *et al.* evaluaron el efecto del tratamiento criogénico del carburo recubierto P-30 en el desgaste del flanco, la fuerza principal de corte y la rugosidad superficial utilizando hasta 350 m/min de velocidad de corte^[23]. Estos autores no utilizaron en sus estudios velocidades de corte superiores a 350 m/min.

Özel *et al.* (2009) analizaron 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 (340 y 470 m/min)^[24]. Estos autores consideraron hasta velocidades de corte moderadas, además no utilizaron carburos recubiertos.

Stanford *et al.* (2009) investigaron la influencia de varios métodos de aplicación de los fluidos de corte, incluyendo el mecanizado en seco del acero AISI 1015, en el desgaste del cráter y del flanco, el espesor de la viruta, la fuerza de corte tangencial y de avance, la longitud de contacto herramienta-viruta de un carburo sin recubrimiento utilizando hasta 400 m/min de velocidad de corte^[25]. En este estudio no se utilizan insertos con recubrimiento ni cermet y no se analizan velocidades de corte superiores a 400 m/min.

De la exposición anterior se concluye que existen pocos estudios que integren en el análisis, las fuerzas de corte en el mecanizado en seco de alta velocidad de aceros al carbono de construcción utilizados en la fabricación de elementos de máquinas, en función de diferentes rangos de velocidad de corte. Por tanto,

el presente trabajo tiene por objetivo el estudio experimental de la evolución de las fuerza de corte resultante de dos insertos de carburo recubierto y un cermet, durante el torneado en seco del acero AISI 1045 con velocidades de corte de 400, 500 y 600 m/min. Además, se introduce un nuevo criterio para el análisis del rendimiento de las operaciones de mecanizado, el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte.

2. DESARROLLO

A continuación se muestran el procedimiento experimental, el montaje experimental y el diseño de la investigación.

2.2. Procedimiento experimental

2.2.1. Material de las probetas

Se utilizó como material para las probetas el acero al carbono AISI-SAE 1045 obtenido por los procesos de fundición y laminado en caliente, de gran aplicación a nivel mundial en la fabricación de elementos para la industria metalmecánica 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. Las probetas fueron caracterizadas en cuanto a: composición

química, microestructura, tamaño del grano y dureza^[26].

2.2.2. Herramientas de corte

Como insertos fueron utilizados el cermet sin recubrimiento CT5015-P10 y los metales duros recubiertos CVD GC4215-P15 y GC4225-P25, de la marca Sandvik. Fue determinada la composición química del sustrato y de los recubrimientos de los insertos, el espesor del recubrimiento, además de una inspección previa de las superficies de ataque y de incidencia principal, así como la medición de la rugosidad superficial y dureza^[26].

La geometría seleccionada para los tres insertos fue CCMT 12 04 04-PF, la cual presenta rompevirutas. Las plaquitas fueron colocadas sobre un portaherramientas marca Sandvik de referencia SCLCR/L 2020K 12, con un ángulo de posición principal del filo de corte de 95°, un ángulo de ataque de 0°, un ángulo de incidencia principal de 7° y un ángulo de inclinación de filo de corte de 0°. Estas herramientas tienen filos de corte redondeados con un radio de 0,4 mm^[27].

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 frecuencia 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 775 mm como longitud máxima a maquinar.

Tabla II. Variables evaluadas en el estudio

Table II. Evaluated variables in study

Variable	Tipo de variable	Medida
Fuerzas de corte	Dependiente	Fuerzas de corte Fx, Fy, Fz (N)
Material de la herramienta	Independiente	Cermet CT5015 (P10 según ISO) sin recubrimiento y carburos recubiertos GC4215 (P15 según ISO) y GC4225 (P25 según ISO)
Velocidad de corte	Independiente	400, 500 y 600 m/min
Tiempo de mecanizado	Independiente	Tiempo de mecanizado (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)

2.3. Montaje experimental y diseño factorial de la investigación

La investigación consistió en determinar la progresión de las fuerzas de corte de tres insertos durante el torneado en seco variando los límites de la velocidad de corte. Se utilizaron en el estudio diez 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. Se establecieron tres niveles de velocidades de corte: (a) moderada ($v = 400$ m/min), (b) intermedia ($v = 500$ m/min) y (c) alta ($v = 600$ m/min). 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 el ensayo. En la tabla II aparecen las variables estudiadas.

El experimento fue llevado a cabo utilizando tres niveles de material de la herramienta, tres niveles de velocidad de corte y cinco niveles de tiempo de mecanizado. Se realizaron dos réplicas con cada juego de datos para la adquisición de la información, por lo que en total fueron 90 mediciones. Se ejecutaron ensayos pilotos para comprobar todas las condiciones de experimentación, equipos de medición, máquina herramienta y herramientas de corte.

Los parámetros del régimen de corte seleccionados están en función del objetivo de la investigación. Para el caso de la velocidad de corte moderada, el fabricante recomienda los valores asumidos en el experimento, con la particularidad de que son válidos sólo en caso de utilizar refrigerante y para un acero de contenido medio de carbono de 150 HB de dureza (en este estudio el corte es en seco y la dureza de la pieza es HB 258). Para las velocidades de corte intermedia y alta, los valores no se suministran por el fabricante de los insertos, por lo que las cuantías utilizadas están por encima del límite establecido, con la intención de evaluar el comportamiento de los insertos a estos niveles críticos de velocidad.

Se utilizaron los dos filos de corte de cada inserto que proporciona la misma cara. Se cilindraron las probetas, midiendo las fuerzas de corte utilizando un dinamómetro piezoeléctrico Kistler. La selección de la probeta, de la herramienta de corte y el orden del ensayo, fue completamente aleatoria.

2.4. Medición de las fuerzas de corte

Fueron medidos los tres componentes de las fuerzas de corte utilizando un dinamómetro piezoeléctrico Kistler 9257B. Además fueron requeridos aditamentos adicionales para utilizar este instrumento, como un sujetador de portainseros Kistler 9403, un cable de conexión del dinamómetro blindado contra inter-

ferencia Kistler 1687B5, un amplificador de señales de tres canales Kistler 5814B1, un bloque conector de entradas BNC a DAQ modelo BNC-2120, una tarjeta de adquisición de datos DaqCard-6062E y el software LABVIEW (versión 8.0).

Después de la adquisición de la señal se obtuvieron los archivos, los cuales contienen la información por canal del piezoeléctrico; luego fue utilizado el software MATLAB (versión 2008a) para el proceso de filtrado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los efectos del desgaste de los insertos en las fuerzas de corte son de gran interés porque ellas afectan a la exactitud y la eficiencia del proceso de mecanizado y, por ende, a la calidad del producto y las ganancias. Además, se requiere del conocimiento de las fuerzas de corte para el diseño de la herramienta de corte, de la máquina herramienta y de los dispositivos de sujeción de la pieza, y de esta forma lograr que el sistema tecnológico pueda resistir los esfuerzos de corte, evitando así distorsiones y vibraciones. En general, las fuerzas de corte son la variable más efectiva para evaluar el rendimiento del proceso de mecanizado^[10]. A continuación se muestran los resultados para la fuerza de corte resultante.

3.1. Evolución de la fuerza de corte resultante

La fuerza de corte resultante F_R (N) es determinada por la ecuación (1):

$$F_R = \sqrt{F_z^2 + F_y^2 + F_x^2} \quad (1)$$

En la figura 3 (a) se muestra la evolución de las fuerzas de corte resultante para $v = 400$ m/min, en la que se observa un comportamiento zigzagueante para los tres insertos. Al llegar a $T = 10$ min el mayor valor de F_R es para la plaquita GC4215, mientras que el inserto CT5015 logra el menor valor y por tanto el mejor rendimiento.

Resultado similar se observa para $v = 500$ m/min (Fig. 3 (b)), aunque el inserto CT5015 presenta una evolución más regular. Al llegar a $T = 5$ min la fuerza de corte resultante de la plaquita GC4225, alcanza el mayor valor y cercano al valor de F_R de GC4215, mientras que el inserto CT5015 consigue el mejor rendimiento.

Para la alta velocidad de corte (Fig. 3 (c)), la tendencia de F_R es de crecer, fundamentalmente para

los insertos GC4225 y CT5015 a partir de $T = 3$ min, mientras que el carburo recubierto con tres capas GC4215 logra un resultado más estable, lo cual puede estar relacionado con el comportamiento de los mismos en cuanto al desgaste del flanco^[26].

La comparación de la fuerza de corte resultante para las diferentes velocidades de corte se ilustra en la figura 3 (d). Se observa un resultado más regular para el inserto GC4215, mientras que los menores valores fueron para la plaquita CT5015. Al aumentar la velocidad de corte de 500 m/min a 600 m/min se aprecia un aumento de F_R para los insertos CT5015 y GC4225, lo que podría estar relacionado con el incremento del desgaste de los mismos^[26].

Se advierte que, con el incremento de la velocidad de corte, las fuerzas de corte son menores significativamente para el inserto sin recubrir (CT5015). Esto se debe a que el aumento de la velocidad provoca también un incremento de la temperatura de corte, pero el Cermet (presenta un 5,7 % de Al_2O_3) tiene menor conductividad térmica que los carburos recubiertos (para el Al_2O_3 , ver en la figura 1 la disminución de la misma con el aumento de la temperatura, así como

en la tabla I su efecto de barrera térmica), por tanto, retiene menor calor e implica que la pieza va a tener mayor temperatura, reduciendo la resistencia al corte de la misma y consecuentemente las fuerzas de corte, argumento coincidente con lo expuesto por Silva^[28], Tangjitsitcharoen^[22] y Ghani *et al.*^[12]. Además, como se observa en la tabla I, el Al_2O_3 proporciona un pequeño coeficiente de fricción.

3.2. Análisis de las fuerzas de corte utilizando el coeficiente de dimensión volumétrica de las fuerzas de corte

Astakhov y Xiao, en el 2008, realizaron un análisis de los principales enfoques utilizados para determinar las fuerzas de corte, y plantearon que, a pesar de que éstas han sido consideradas como uno de los criterios más relevantes para el estudio de la maquinabilidad de los metales, constituye uno de los parámetros menos comprendidos, pues generalmente los valores

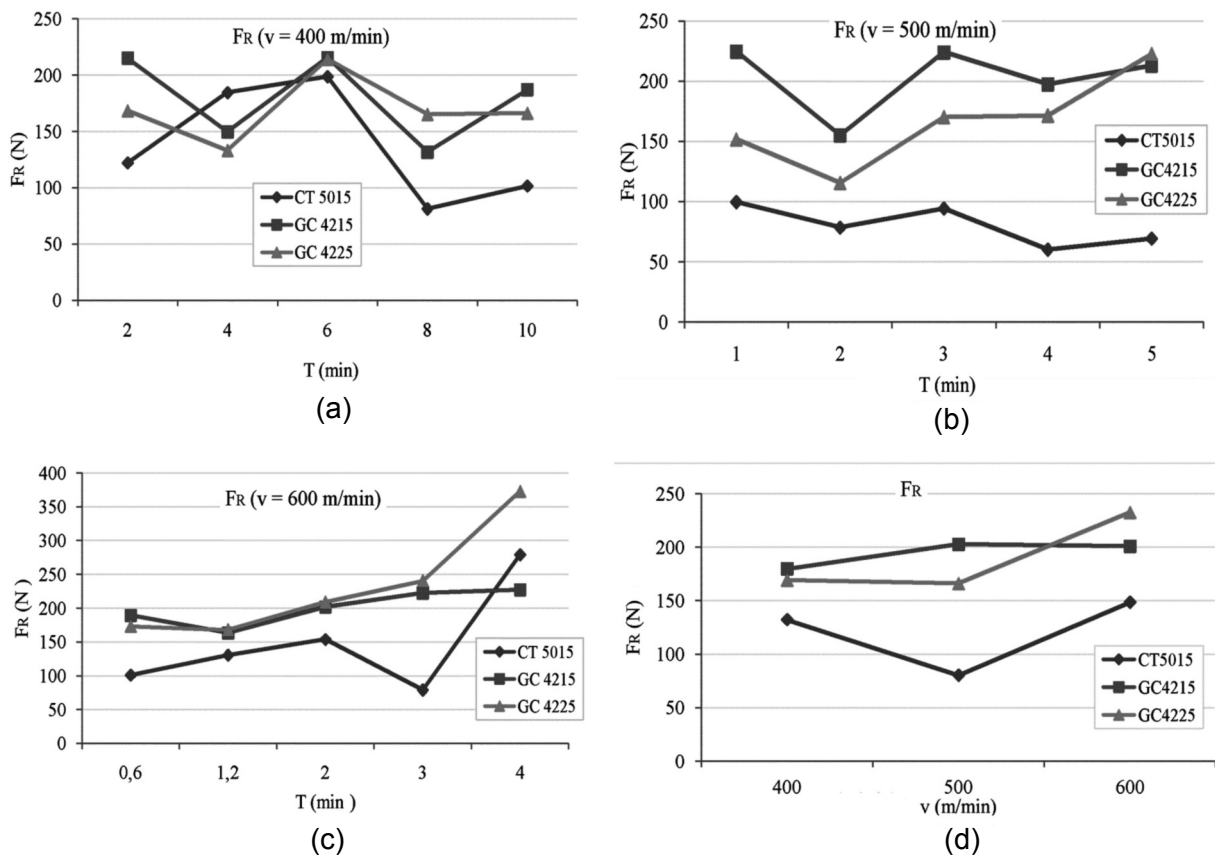


Figura 3. Evolución de F_R para $v = 400$ m/min (a), $v = 500$ m/min (b), $v = 600$ m/min (c) y comportamiento de F_R para las diferentes velocidades de corte (d).

Figure 3. Evolution of F_R for $v = 400$ m/min (a), $v = 500$ m/min (b), $v = 600$ m/min (c) and performance of F_R for different cutting speeds (d).

obtenidos no se corresponden con la realidad, ni se dispone de la metodología adecuada para su medición. Por ello, plantearon una metodología para la estimación práctica de la fuerza y de la potencia de corte haciendo énfasis en el coeficiente de contracción de la viruta, y basada en las potencias gastadas en la deformación plástica de la capa cortada, en la interfase herramienta-viruta, en la interfase herramienta-pieza y en la formación de las nuevas superficies^[9].

Considerando este estudio, se propone un nuevo criterio, el coeficiente de dimensión volumétrica de las fuerzas de corte (V_{FR} , cm^3/N), que representa el volumen de metal cortado por la herramienta de corte (V , cm^3) por cada N de fuerza de corte (F , N) según la ecuación (2):

$$V_{FR} = \frac{V}{F} \quad (2)$$

De esta forma, se relacionan los principales parámetros del régimen de corte con las fuerzas de corte. Este coeficiente permite evaluar desde un nuevo punto de vista, la efectividad del proceso de mecanizado a través de la dependencia entre el volumen de metal cortado

y la fuerza de corte. Es evidente que el inserto que consiga un mayor coeficiente V_{FR} , posee un mejor rendimiento durante el mecanizado para las condiciones de elaboración dadas, indicando que el volumen de metal cortado crece en mayor proporción que la fuerza de corte.

Se calcula el volumen de metal mecanizado o eliminado (V , cm^3) a partir de la ecuación (3).

$$V = v \cdot f \cdot a \cdot T \quad (3)$$

En la figura 4 (a) se muestra la evolución del coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante (V_{FR}) para $v = 400$ m/min. Se observa un rendimiento similar hasta llegar a $T = 6$ min, a partir de este momento es superior el inserto CT5015, mientras que los insertos GC4215 y GC4225 consiguen un V_{FR} aproximado.

En la figura 4 (b) se expone la gráfica para $v = 500$ m/min. Se observa que hasta $T = 2$ min los tres insertos logran un V_{FR} cercano, posteriormente el inserto CT5015 es superior.

Para $v = 600$ m/min (Fig. 4 (c)) y hasta $T = 2$ min, los tres insertos logran un valor V_{FR} próximo, luego el V_{FR} del inserto CT5015 comienza a crecer en

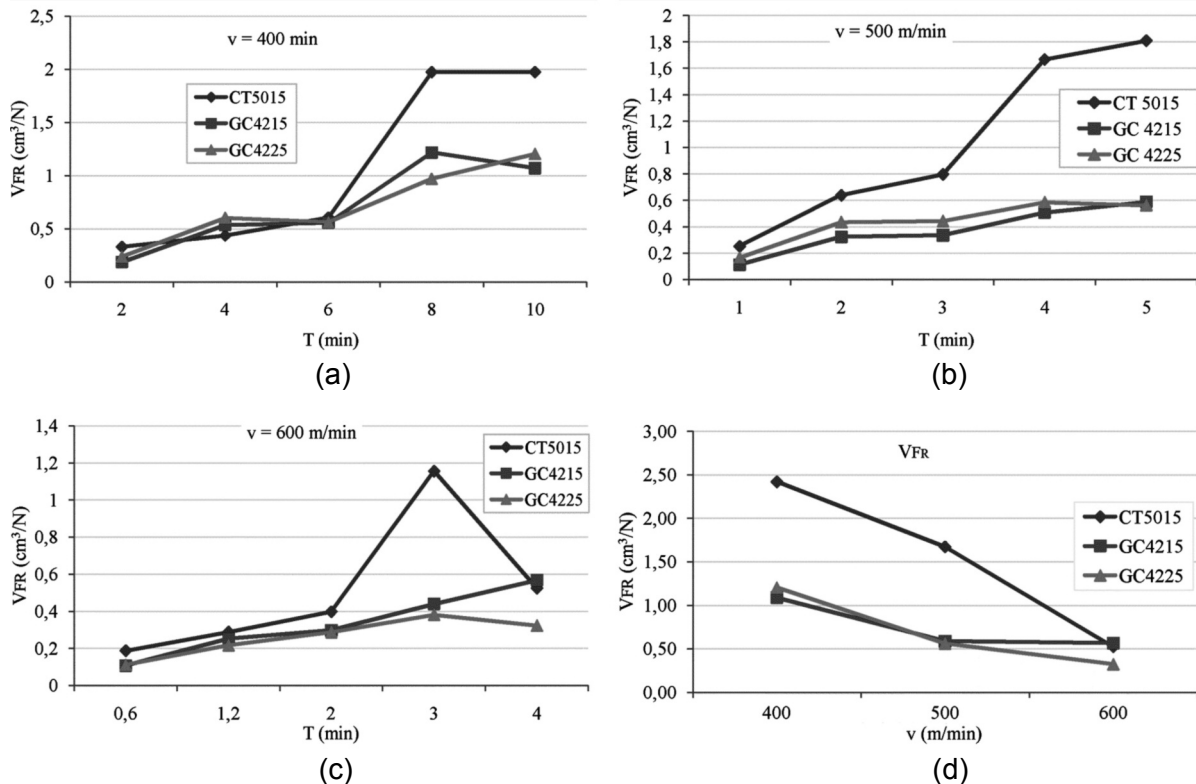


Figura 4. Evolución de V_{FR} para $v = 400$ m/min (a), $v = 500$ m/min (b), $v = 600$ m/min (c) y comportamiento para las diferentes velocidades de corte (d).

Figure 4. Evolution of V_{FR} for $v = 400$ m/min (a), $v = 500$ m/min (b), $v = 600$ m/min (c) and performance for different cutting speeds (d).

mayor proporción, pero después de 3 min de mecanizado empieza a disminuir drásticamente y al llegar a $T = 4$ min se sitúa por debajo del inserto GC4215, lo que puede estar motivado por el crecimiento intensivo del desgaste^[26].

El comportamiento de V_{FR} de los insertos para el tiempo final de mecanizado se presenta en la figura 4 (d). El inserto CT5015 supera a los dos carburos recubiertos para las velocidades de corte moderada e intermedia; esto significa que para el Cermet el volumen de viruta mecanizado crece en mayor proporción que la fuerza de corte resultante, mientras que para $v = 600$ m/min los tres insertos consiguen un V_{FR} muy cercano, aunque el inserto GC4215 logra un rendimiento ligeramente superior.

Para determinar si las variables tiempo de mecanizado y material de inserto, así como su interacción, tienen un efecto significativo en el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante, se realiza el análisis de varianza factorial, utilizando el *software* STATGRAPHICS Centurion XV (versión 15.2.14).

3.2.1. Análisis de varianza factorial del coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante

En la tabla III se muestran los resultados de la comparación para las tres velocidades de corte, midiendo la contribución de cada factor y eliminando los efectos del resto de los factores. Los p-valores (probabilidad de F) reflejan la importancia estadística de cada uno de los factores. El factor tiempo tiene un efecto estadísticamente significativo en V_{FR} para las tres velocidades de corte para un nivel de confianza del 95,0 %, ya que el valor de p es inferior a 0,05. Sin embargo, la variable material de inserto y la interacción de los dos factores presentan un efecto signifi-

cativo sólo para la velocidad de corte intermedia, para dicho nivel de confianza.

Con el objetivo de determinar si al menos una de las medias de V_{FR} es diferente de las demás, se aplica el procedimiento de comparación múltiple. El método utilizado para discernir entre las medias fue el de las menores diferencias significativas de Fisher.

Para $v = 400$ m/min, la diferencia estimada manifiesta que entre el V_{FR} de los insertos CT5015-GC4215 y CT5015-GC4225, existe una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95,0 %, siendo el mayor valor promedio de V_{FR} ($1,166 \text{ cm}^3/\text{N}$) para la plaquita CT5015, mientras que para la variable tiempo los grupos 2-8; 2-10; 4-8; 4-10; 6-8 y 6-10 presentan una diferencia estadísticamente significativa, perteneciendo a $T = 10$ min el mayor valor promedio de V_{FR} ($1,574 \text{ cm}^3/\text{N}$) (Fig. 5 (a)).

Para la velocidad de corte intermedia, se obtuvo que entre el V_{FR} de los grupos de los insertos CT5015-GC4215 y CT5015-GC4225, existe una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95,0 %, siendo el mayor valor promedio de V_{FR} ($0,896 \text{ cm}^3/\text{N}$) para la plaquita CT5015 (Fig. 5 (b)), mientras que para la variable tiempo son homogéneos solamente los grupos 2-3 y 4-5, perteneciendo a $T = 5$ min el mayor valor promedio de V_{FR} ($0,940 \text{ cm}^3/\text{N}$). Por su parte, el gráfico de interacciones tiempo-inserto revela que el mayor valor de V_{FR} es alcanzado por el inserto CT5015 para $T = 5$ min.

Por último, para la velocidad de corte alta, se reveló que las medias de V_{FR} de los grupos CT5015-GC4225 presentan diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95,0 %, siendo el mayor valor promedio de V_{FR} ($0,509 \text{ cm}^3/\text{N}$) para el inserto CT5015, mientras que para la variable tiempo, presentan diferencias estadísticamente significativas los grupos 0,6-3; 0,6-4; 1,2-3 y 2-3, perteneciendo a $T = 3$ min el mayor valor promedio de V_{FR} ($0,657 \text{ cm}^3/\text{N}$), ver figura 5 (c).

Tabla III. Resultados del análisis de varianza factorial del coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante

Table III. Results of analysis of factorial variance of the volumetric coefficient of resultant cutting force

Velocidad de corte	$v = 400$ m/min	$v = 500$ m/min	$v = 600$ m/min
Fuente	p-valor	p-valor	p-valor
Tiempo de mecanizado	0,000	0,000	0,014
Inserto	0,062	0,000	0,086
Inserto-Tiempo	0,301	0,000	0,384

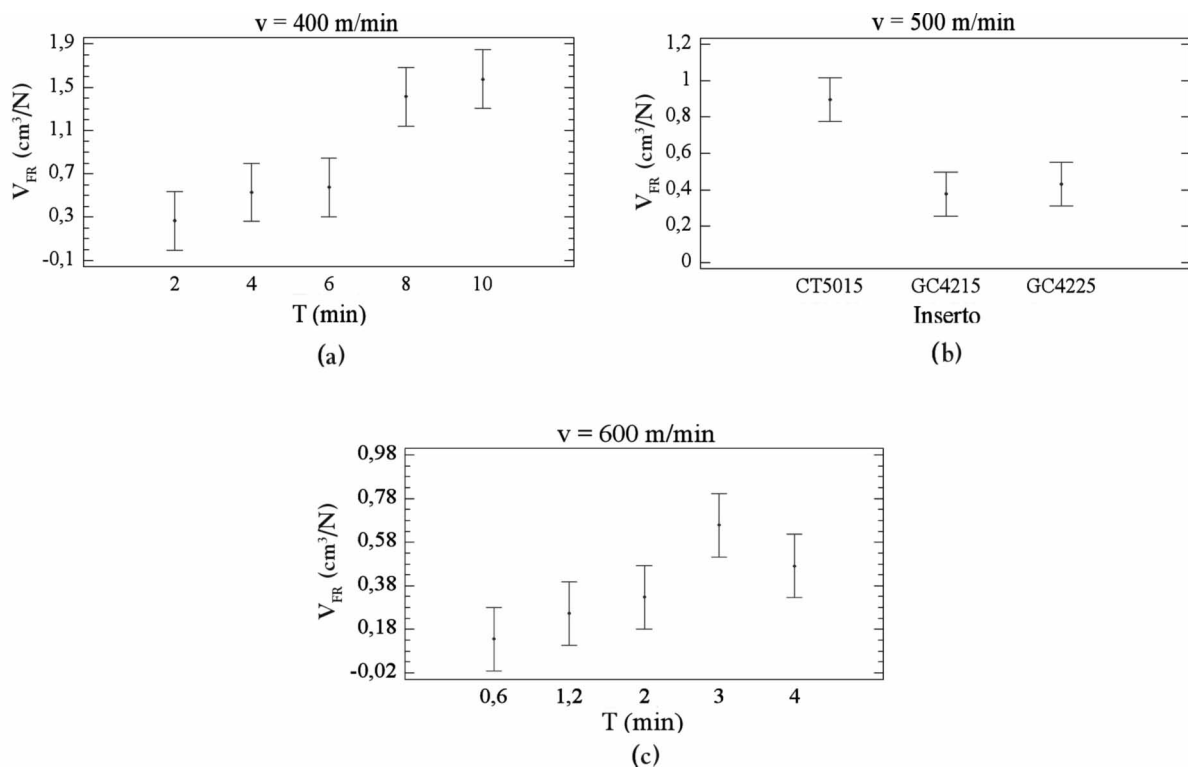


Figura 5. Gráficas de medias de V_{FR} para $v = 400$ m/min (a), $v = 500$ m/min (b) y $v = 600$ m/min (c), para un nivel de confianza de 95 %.

Figure 5. Graphs of means of V_{FR} for $v = 400$ m/min (a), $v = 500$ m/min (b) and $v = 600$ m/min (c), for a 95 % of confidence level.

El análisis de varianza factorial muestra para las tres velocidades de corte, que la variable tiempo de mecanizado tiene un efecto estadísticamente significativo en V_{FR} para un nivel de confianza de 95 %, sin embargo, sólo para $v = 500$ m/min el material de inserto y la interacción de las variables presentan un efecto estadístico significativo. Se confirma que el inserto CT5015 consigue el mayor valor promedio de V_{FR} para las velocidades de corte analizadas; no obstante, para $v = 600$ m/min y $T = 4$ min el inserto GC4215 logra el mejor resultado, lo que puede estar relacionado con su notable rendimiento en cuanto al desgaste del flanco para dicha velocidad de corte^[26].

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se plantean las siguientes conclusiones:

- La comparación de la fuerza de corte resultante para las diferentes velocidades de corte mostró un resultado más regular para el inserto GC4215,

mientras que los menores valores fueron para la plaquita CT5015. Al aumentar la velocidad de corte de 500 m/min a 600 m/min se apreció un aumento de F_R para los insertos CT5015 y GC4225, lo que podría estar relacionado con el incremento del desgaste de los mismos.

- Fue introducido un nuevo criterio para el estudio del rendimiento de la operación de mecanizado, el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte, el cual relaciona los principales parámetros de mecanizado con la fuerza de corte. Este coeficiente permite evaluar desde un nuevo punto de vista, la efectividad del proceso de elaboración a través de la relación entre el volumen de metal mecanizado y la fuerza de corte.
- El coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante mostró que el inserto CT5015 supera a los dos carburos recubiertos para las velocidades de corte moderada e intermedia. Esto significa que para el Cermet el volumen de viruta mecanizado creció en mayor proporción que la fuerza de corte resultante, mientras que

para la velocidad de corte alta los tres insertos consiguen un V_{FR} muy cercano, aunque el inserto GC4215 logra un rendimiento ligeramente superior para el tiempo final de mecanizado.

— El análisis de varianza factorial demostró para las tres velocidades de corte, que el tiempo de mecanizado tiene un efecto estadísticamente significativo en el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante para un nivel de confianza de 95 %. Sin embargo, sólo para la velocidad de corte intermedia el material de inserto y la interacción de las variables presentaron un efecto estadístico significativo. Además, se confirmó que el inserto CT5015 consigue el mayor valor promedio de V_{FR} para las velocidades de corte consideradas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a PRONABES por proporcionar una 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 todo el apoyo material y financiero, y al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (México, Campus de Monterrey), por todas las facilidades brindadas para el desarrollo de la investigación. Se agradece al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Holguín, por el apoyo proporcionado.

Nomenclatura

a (mm)	Profundidad de corte
F (N)	Fuerza de corte
F	Distribución F
F_R (N)	Fuerza de corte resultante
F_x (N)	Fuerza de corte axial
F_y (N)	Fuerza de corte radial
F_z (N)	Fuerza de corte tangencial
f (mm/r)	Avance
p	Probabilidad
T (min)	Tiempo de mecanizado
V (cm ³)	Volumen de metal mecanizado
V_{FR} (cm ³ /N)	Coefficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante
v (m/min)	Velocidad de corte

REFERENCIAS

- [1] F. Martínez, T. Sánchez, G. Frías y A. Pinilla, *Ingeniería Mecánica* 9 (2006) 7-12.
- [2] W. Grzesik, *High Speed Machining. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. Theory, Modelling and Applications*, Ed. Elsevier, Amsterdam, Holanda, 2008, pp. 213-226.
- [3] J. Longbottom y J. Lanham, *Int. J. Mach. Tool Manu.* 46 (2006) 1.740-1.747.
- [4] V. Arshinov y G. Alekseev, *Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design*, Ed. Mir, Moscú, URSS, 1970, pp. 115-133.
- [5] Y. Quan, Z. He y Y. Dou, *Front. Mech. Eng. Chin.* 3 (2008) 175-179.
- [6] V.P. Astakhov, *Improvements of Tribological Conditions. Tribology of Metal Cutting*, B.J. Briscoe (Ed.) Elsevier, Londres, Inglaterra, 2006, pp. 326-390.
- [7] C. Vikram, P. Kesavan y B. Ramamoorthy, *Int. J. Mach. Mach. Mater.* 3 (2008) 133-142.
- [8] V.P. Astakhov y J.P. Davim, *Tools (Geometry and Material) and Tool Wear. Machining. Fundamentals and Recent Advances*, J.P. Davim (Ed.) Springer-Verlag, Londres, Inglaterra, 2008, pp. 29-57.
- [9] V.P. Astakhov y X. Xiao, *Mach. Sci. Technol.* 12 (2008) 325-347.
- [10] Y. Long, Tesis Doctoral, Clemson University, Ann Arbor, Michigan, EE.UU., 2008.
- [11] H. Youssef y H. El-Hofy, *Basic Elements and Mechanisms of Machine Tools. Machining Technology: Machine tools and operations*, Ed. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, EE.UU., 2008, pp. 11-57.
- [12] M. Ghani, N. Abukhshim y M. Sheikh, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 39 (2008) 874-888.
- [13] W. Grzesik y P. Niestony, *Arch. Mat. Sci. Eng.* 29 (2008) 105-108.
- [14] W. Grzesik, *Cutting tool materials. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. Theory, Modelling and Applications*, Ed. Elsevier, Amsterdam, Holanda, 2008, pp. 27-48.
- [15] M. Noordin, V. Venkatesh, S. Sharif, S. Elting y A. Abdullah, *J. Mater. Process. Tech.* 145 (2004) 46-58.
- [16] J.C. Outeiro y V.P. Astakhov, *CIRP-8*, R. Neugebauer (Ed.) Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz, Alemania, 2005, pp. 517-523.
- [17] I. Essel, Tesis Doctoral, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen, Alemania, 2006.
- [18] S. Iqbal, P. Mativenga y M. Sheikh, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part B: J. Eng. Manuf.* 221 (2007) 909-916.

- [19] R. Tanaka, Y. Yamane, K. Sekiya, N. Narutaki y T. Shiraga, *Int. J. Mach. Tool Manu.* 47 (2007) 1.971-1.977.
- [20] M. Tawfiq, *Eng. & Tech.* 26 (2008) 21-32.
- [21] S. Iqbal, P. Mativenga y M. Sheikh, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 42 (2009) 30-40.
- [22] S. Tangjitsitcharoen, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part. J: J. Eng. Tribol.* 224 (2009) 209-219.
- [23] T. SreeramaReddy, T. Sornakumar, M. Venkataram, A. Reddy y R. Venkatram, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 27 (2009) 181-185.
- [24] T. Özel, A. Esteves y J. Davim, *Int. J. Mater. Prod. Tech.* 35 (2009) 246-258.
- [25] M. Stanford, P. M. Lister, C. Morgan y K.A. Kibble, *J. Mater. Process. Tech.* 209 (2009) 961-972.
- [26] L.W. Hernández, R. Pérez, P.C. Zambrano, M.P. Guerrero y L. Dumitrescu, *Rev. Metal.* 47 (2011) 262-272.
- [27] SANDVIK Coromant, *Torneado General*, Suecia, 2009, pp. A4-A54.
- [28] J. Silva, Tesis Doctoral, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2007.