

# LOS RECUBRIMIENTOS Y MATERIALES CERÁMICOS EN EL MECANIZADO EFICAZ

Gilberto Bejarano Gaitán  
Profesional SENA, CDT ASTIN

## PRESENTACIÓN

El mecanizado de materiales duros presenta grandes dificultades en lo referente a la vida útil de las herramientas, sus filos y geometría, los parámetros de mecanizado y los sistemas portaherramientas. Las herramientas de acero utilizadas y las mezclas metal - carburos no dan una solución aceptable a estos problemas técnicos. Razón por la cual, los trabajos de investigación actuales apuntan al desarrollo de diferentes recubrimientos cerámicos con grandes prestaciones. En este artículo se analizan varios sistemas cerámicos aplicados a las herramientas y se presentan las ventajas alcanzadas en el mecanizado de materiales duros considerando además los aspectos ambientales.

## INTRODUCCIÓN

Para que los procesos de manufactura sean más rentables y competitivos, deben incorporar tecnologías modernas, que permitan grandes tirajes con cortos ciclos de producción, bajos costos de mantenimiento, cero reprocesos y productos de buena calidad, respetando siempre las

buenas prácticas de trabajo frente a los problemas ambientales. Esto requiere, no sólo de máquinas y equipos modernos, sino también de herramientas que respondan a las altas exigencias de carga y condiciones críticas de operación, sobre todo en el mecanizado de materiales de alta dureza. Tres aspectos importantes son objeto de investigación y desarrollo para obtener estas herramientas:

- Los materiales con los cuales se fabrican las herramientas
- El diseño de la herramienta misma
- El proceso de fabricación de ésta.

Con base en lo anterior se han diseñado y fabricado una serie de herramientas con aceros altamente aleados, como los aceros rápidos, con aceros a partir de la pulvimetalurgia, con metales duros y con materiales cerámicos de alto rendimiento. Por los grandes logros alcanzados con el último grupo de materiales, éste trabajo se concentra en el estudio y análisis de ellos.

## CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Los materiales duros que presentan grandes dificultades en el mecanizado se pueden clasificar en los siguientes cuatro grupos [1]:

- Aceros con durezas entre 60 y 65 HRC
- Fundiciones de hierro entre 550 y 750 HRB
- Superaleaciones de base Cobalto y Níquel hasta 58 HRC
- Materiales sinterizados

En el caso del mecanizado de los aceros recocidos, con durezas hasta de 40 HRC, se pueden ajustar los parámetros de corte, de tal manera que se formen virutas en forma de "6 o de 9", las cuales representan los menores problemas de las virutas conocidas. Sin embargo, cuando se trabaja a grandes velocidades de corte, se generan temperaturas demasiado altas, que no solamente producen soldadura de la viruta con la herramienta, sino también procesos de difusión que originan el desgaste prematuro de ésta, en particular si están fabricadas en WC o en diamante, como veremos más adelante.

En los aceros duros y en la fundición de hierro las virutas son cortas y en forma de "C", las cuales se fracturan con mayor facilidad, permitiendo así un mecanizado más rápido. Un enorme problema lo representan los carburos finos y duros que constituyen la microestructura de estos materiales tales (WC, VC, TiC, MoC y el CrxCy) y el polvillo altamente abrasivo de los cerámicos, que originan microfisuras en los filos de la herramienta y su desgaste prematuro. Estos fenómenos conllevan al desarrollo de una gran variedad de materiales como los aceros rápidos, los metales duros, los materiales cerámicos sinterizados y últimamente los materiales cerámicos obtenidos a partir de la deposición física y química de vapor PVD y CVD.

## MATERIALES DUROS PARA HERRAMIENTAS DE CORTE

### METALES DUROS

Aunque este grupo de materiales, que presentan durezas mayores a los 1000 HV, ya fueron suficientemente estudiados y han sido reemplazados por otros materiales de avanzada, son dignos de mencionar, porque marcan el punto de partida para el desarrollo de los materiales cerámicos modernos y porque aún son utilizados en la industria colombiana.

Las aleaciones pertenecientes a este grupo pueden considerarse como materiales compuestos de matriz metálica y refuerzo metaloide de diferentes tipos de carburos, nitruros, carbonitruros, boruros y óxidos. Dependiendo del contenido metaloide o cerámico se

diferencian, ante todo, por su brillo superficial, su conductividad térmica y eléctrica y por su tenacidad. El carácter tenaz viene dado por el tipo y cantidad de aglutinante (Fe, Co, Ni), que constituye la matriz del compuesto y que forma una segunda fase que envuelve totalmente las partículas duras del material [2].

### 1. Carburos

Por ser el carburo de tungsteno el metal duro de mayor importancia y de más utilización en nuestro medio, se trata aquí en forma detallada. Las figuras 1 y 2 muestran la microestructura de un tipo de carburo de tungsteno y el diagrama de equilibrio termodinámico del tungsteno / carbono.

El WC forma una capa protectora de óxidos a partir de los 400°C, que lo pasiva y lo protege contra algunos medios agresivos. Sin embargo, esta capa se disuelve

por encima de los 1000°C, y el WC queda expuesto al contacto directo con la pieza que se está mecanizando y con la viruta encandeciente, generando un proceso de difusión del carbono y desgaste de la herramienta.

Por la similar estructura cristalina y distancias interatómicas, el WC posee una buena solubilidad con la mayoría de los carburos de otros metales, lo que facilita su combinación, mejorando así sus propiedades físicas, químicas y mecánicas y ampliando de esta manera la gama de aplicaciones industriales de este material. Así por ejemplo, existen combinaciones de WC con TiC, TaC, NbC y HfC, VC y CrxCy que poseen gran dureza, una mayor tenacidad, estabilidad térmica y alta inactividad química frente a otros metales. Estos carburos actúan además como afinadores de grano del WC. La figura 3 muestra por ejemplo el diagrama ternario WC - TiC - Co [2].

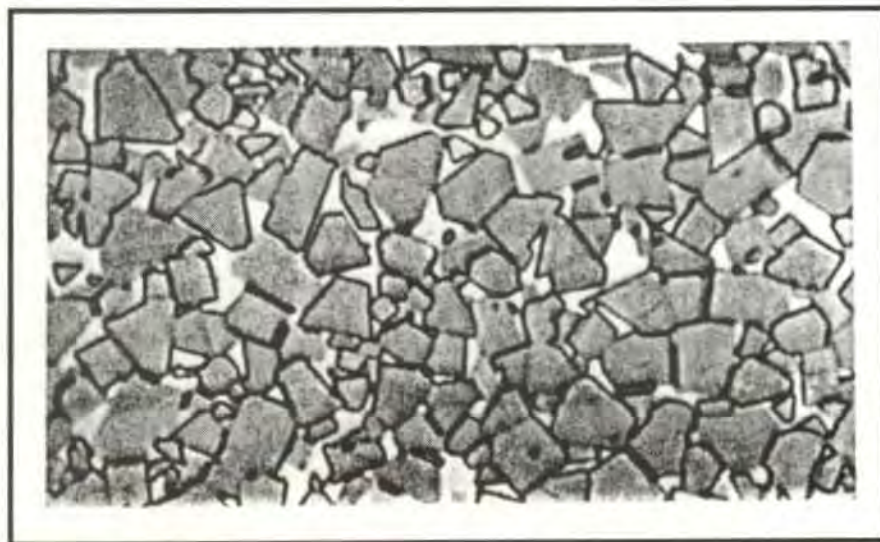


Figura 1. Microestructura del WC-8Co (x1500) [2]

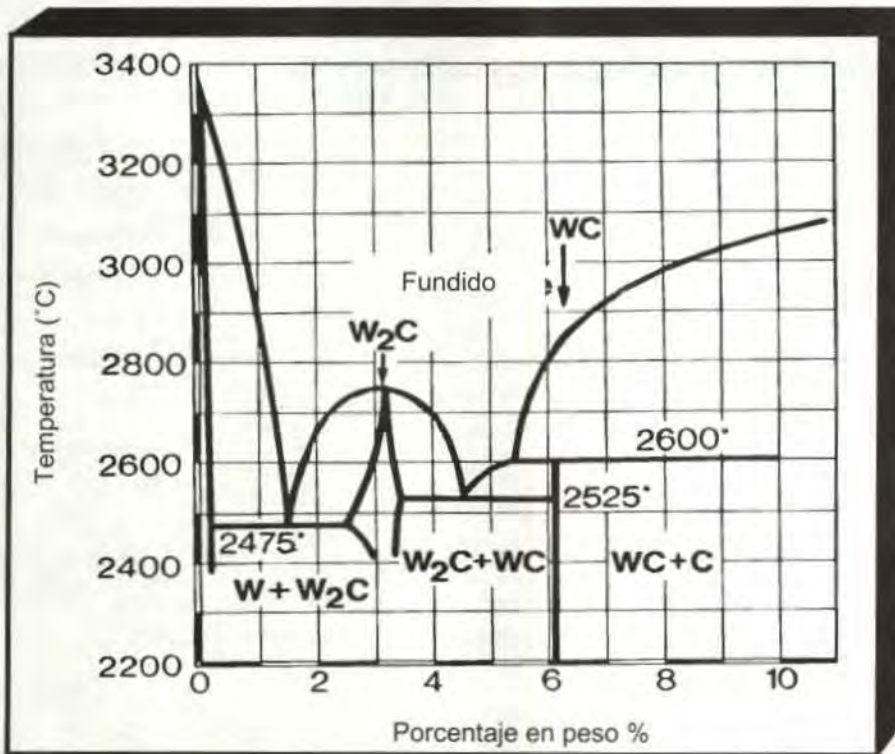


Figura 2. Diagrama de equilibrio W - C [2]

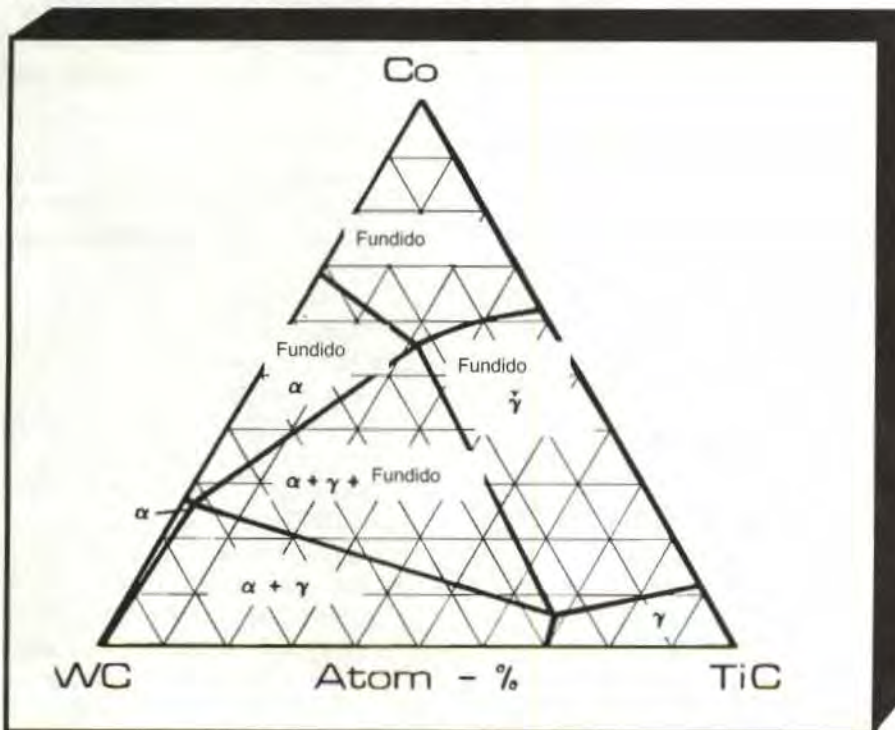


Figura 3. Diagrama de equilibrio WC - TiC - Co, corte a 1400°C [2]

Para que haya una buena sinergia e interacción entre la matriz y el refuerzo en este tipo de materiales, el aglutinante debe poseer las siguientes características:

- Debe formar una fase líquida a la temperatura de sinterización
- La fase líquida debe mojar por completo la fase dura
- La fase líquida debe tener buena solubilidad para la fase dura a la temperatura de sinterización, pero tendiente a cero en el enfriamiento para posibilitar su precipitación
- La fase líquida no debe reaccionar con la fase dura formando otras fases y por ello ser consumida
- La fase aglutinante debe poseer propiedades mecánicas, que soporten las cargas a temperatura de trabajo de la herramienta y no se rompa en la interface.

#### Carburo de boro (B<sub>4</sub>C)

Se fabrica principalmente en hornos eléctricos a partir del ácido bórico y carbono. Su extrema dureza lo ha llevado a ser utilizado como medio de pulido y de desbaste en la fabricación de lijas y discos de corte, pero la falta de un aglutinante apropiado no ha permitido su empleo en aplicaciones de herramientas para procesos de mecanizado y conformado de otros materiales [2].

#### Carburo de silicio (SiC)

Se fabrica de manera similar al carburo de boro a partir de arena

PROPIEDAD	WC	TiC	TaC	NbC	VC	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C
Estructura cristalina	Hex	ccc	ccc	ccc	ccc	Orto romb	Hex
Densidad g/cm <sup>3</sup>	15,7	4,9	14,5	7,8	5,7	6,7	9,2
Microdureza dN/mm <sup>2</sup>	2080	3200	1790	2400	2950	2280	1950
Módulo de elasticidad KN/mm <sup>2</sup>	296	451	285	338	422	373	533
Punto de fusión °C	2600 Z	3160	3780	3500	2830	1875 Z	2400 Z
Coeficiente de dilatación térmica 20 – 400°C 10 <sup>-6</sup> /K	5,2	7,7	6,3	6,7	7,2	10,3	7,8
Resistencia eléctrica Microohm.cm	22	68	25	35	60	75	133

Hex = Celda hexagonal  
ccc = Centrada cúbica en las caras  
Z = Descomposición

Tabla 1. Propiedades de algunos carburos convencionales [2]

de sílice, carbono y cloruro de sodio. Su aplicación especial esta en el campo de las lijas, discos de corte, ladrillos refractarios y crisoles. También se utiliza como fibra reforzante en otros materiales compuestos y obtenido mediante la tecnología del PVD se emplea además como recubrimiento duros en herramientas de corte.

En la tabla 1 se observan las propiedades más importantes de algunos carburos

## 2. Nitruros

Los nitruros poseen un carácter metálico menor que los carburos y más baja tenacidad, pero tiene una mayor eficiencia en el mecanizado de los aceros y de otros materiales ferrosos, ya que presentan una menor actividad química frente a los microconstituyentes de éstos, un coeficiente

de fricción menor y mayor resistencia al desgaste en caliente. Debido a la apariencia óptica, por los colores que presentan algunos nitruros en combinación con ciertos carburos, tienen amplia aplicación como recubrimientos decorativos resistentes al rayado en el campo de la joyería y de la relojería. Así por ejemplo el TiN es de color dorado, con 10% de TiC es rojo - dorado, con 15% es rojo violeta y con 20% violeta. El ZrN es dorado y el HfN gris plateado [2].

## 3. Boruros

Esta gama de materiales poseen, con excepción del diamante, la más alta dureza y la mayor inactividad química frente a otros materiales. Por las características antes mencionadas que deben tener los aglutinantes, ha sido difícil, hasta hoy, encontrar uno

apropiado, que permita la aplicación industrial de estos materiales, por lo que siguen siendo en la actualidad objeto de investigación. Recubrimientos de TiB<sub>2</sub>/CrB<sub>2</sub> así como de BN/TiB<sub>2</sub> se utilizan en elementos que entran en contacto con medios agresivos como el aluminio líquido.

Los electrodos de grafito, empleados en el proceso Heroult para la obtención electrolítica del aluminio, han sido sustituidos por electrodos de éste material, ya que poseen una buena mojabilidad frente al aluminio, una menor resistividad eléctrica, requiere de un menor voltaje de operación y permite reducir sustancialmente los costos del proceso. La tabla 2 muestra las propiedades más importantes de algunos boruros [2].

PROPIEDAD	TiB <sub>2</sub>	ZrB <sub>2</sub>	HfB <sub>2</sub>	VB <sub>2</sub>	NbB <sub>2</sub>	TaB <sub>2</sub>	CrB <sub>2</sub>	MoB	WB
Estructura cristalina	Hex.	Hex.	Hex.	Hex.	Hex.	Hex.	Hex.	Ortho - romb.	Ortho - romb.
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	4,5	6,1	11	5	7	12	5,6	8,5	15,5
Microdureza, Vickers	3480	2200	2900	2080	2600	2200	2250	2500	3750
Módulo de elasticidad [KN/mm <sup>2</sup> ]	374	350					215		
Punto de fusión [°C]	2900	2990	3250	2400	3000	3150	2200	2350	2860
Coefficiente de expansión Térmica [10 <sup>-6</sup> /K]	6,39	6,83	5,3	5,3		5,1	11,1		
Resistividad eléctrica [μΩcm]	9	7	15,8	38	12	21	56	50	

Tabla 2. Propiedades de algunos compuestos de boro [2].

#### 4. Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Se encuentra contenido principalmente como mineral en la bauxita acompañado de diferentes impurezas. En presencia de algunos óxidos forma el zafiro de color azul y el rubí de color rojo. La alúmina ha encontrado amplia aplicación como elemento de desbaste y pulido para aceros y metales ferrosos, en la fabricación de ladrillos refractarios y otros componentes de hornos. En combinación con TiC y ZrO<sub>2</sub> posee una buena tenacidad y puede ser utilizado en la fabricación de herramientas de corte para materiales no ferrosos, matrices de extrusión y diferentes elementos en turbinas y motores

de combustión [2]. La alúmina reforzada con whiskers de SiC y TiC encuentra aplicación en el mecanizado del acero y de las fundiciones de hierro, ya que posee buena tenacidad, es estable térmicamente y tiene baja reactividad química con la mayoría de los metales, aún a altas temperaturas [1,2].

#### MATERIALES CERÁMICOS NANOESTRUCTURALES

En la búsqueda de lograr mayor eficiencia en el mecanizado de los materiales duros y sobre todo reducir el impacto ambiental que ocasionan los medios refrigerantes y lubricantes y disminuir de lado los costos de producción, se

desarrollaron otros materiales, incluyendo casi todos los anteriormente nombrados a partir de la deposición química y física de vapor CVD - PVD. Estos materiales obtenidos como recubrimientos y películas delgadas, con espesores de hasta 2 micras, no necesitan medios aglutinantes y poseen un tamaño de grano del orden de los nanómetros. Estos dos aspectos disminuyen sustancialmente la cantidad y tamaño de los defectos e imperfecciones cristalinas, por lo cual presentan una mayor tenacidad y mejoradas propiedades físicas y mecánicas que los materiales sinterizados a partir de polvos.

El desarrollo de recubrimientos

ultrafinos de TiAlN por la tecnología del PVD de arco pulsado, abre una ventana de posibilidades en el mecanizado del aluminio y del acero inoxidable, que tanto problema causan en este proceso, ya que se adhieren y sueldan a la herramienta. Estos recubrimientos poseen gran dureza, bajo coeficiente de fricción, buena adhesión al sustrato y son químicamente inactivos hasta altas temperaturas de trabajo. La consecuencia de ello es una mayor vida útil de la herramienta, tiempos de mecanizado más cortos, mayor calidad superficial de las piezas y menores costos de producción [3,4].

Las figuras 4a y 4b muestran dos herramientas de corte, una recubierta con TiAlN, la otra sin recubrir, y el respectivo desgaste de ellas. También se observa una broca desgastada en la figura 4c por causa de efectos de adhesión del material en la herramienta. La tabla 3 muestra el rendimiento de un punzón en función del tipo de recubrimiento [3].

Otro enorme problema que acompaña a los fenómenos de desgaste de las herramientas en el proceso de mecanizado, es el que atañe el aspecto medioambiental, originado ante todo por los medios refrigerantes y lubricantes de la herramienta. Es conocido, que los medios refrigerantes y lubricantes así como sus vapores, ocasionan en contacto con el operario, reacciones alérgicas, problemas bronquiales, náuseas, mareos e incluso contribuyen a la formación de diferentes tipos de cáncer, lo que incrementa los costos por incapacidad.

Según datos de 1996, cada año en Alemania, deben deponerse 850.000 toneladas de residuos lubricantes. Los costos de consecución, mantenimiento y deposición de los refrigerantes y lubricantes hacen el 16% de los costos de producción, mientras que los costos de las herramientas representan solo el 4% [3,4].

Diferentes tipos de recubrimientos duros como el diamante, el nitruro de boro cúbico, el TiAlN, el TiCN y

combinaciones de estos con la alúmina, además de ser muy duros y resistentes al desgaste, actúan como barreras térmicas y de difusión y permiten de esa manera el mecanizado en seco, sin utilización de medios refrigerantes, haciendo que el calor generado durante el proceso, se disipe por la viruta. Los siguientes ejemplos, a mano de las figuras 5 y 6, muestran algunas pruebas de mecanizado realizadas con este tipo de materiales.

Los recubrimientos de diamante depositados sobre diferentes metales duros mediante la tecnología del CVD han tenido amplia aplicación en el procesado de componentes en la industria del automóvil y aeroespacial. En pruebas efectuadas sobre piezas fabricadas en aleaciones de aluminio al silicio (A 6061 - T6) altamente abrasivas y reforzadas con 15% de alúmina, las herramientas presentaron un desgaste considerablemente menor que las fabricadas en diamante policristalino sinterizado.



Figura 4a. Herramienta de corte recubierta con TiAlN



Figura 4b. Sin recubrimiento [3]



Figura 4c. Broca desgastada por adhesión de material [4]

Sin recubrir	10.000
Nitruración Iónica	60.000
TiNC	175.000
TiAIN	876.000

Tabla 3. Cantidad de piezas troqueladas en función del tipo de recubrimiento

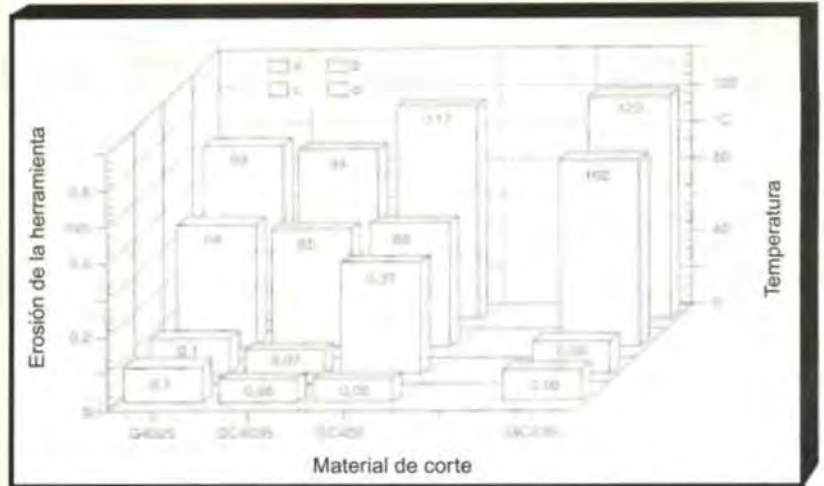


Figura 5. Comparación entre maquinado seco y húmedo al torneado C54, a) desgaste de la herramienta en el torneado húmedo b) en el torneado seco c) temperatura del inserto d) de la pieza

La figura 7 muestra también el comportamiento del diamante monofásico obtenido por CVD frente al carburo de tungsteno microgranular en el mecanizado de una aleación de aluminio A356 - T6 reforzada con 10% de SiC. Se puede apreciar que el diamante monofásico presenta un rendimiento mayor en un 300% [3, 4, 5, 6].

**CONCLUSIONES**

La tendencia de los trabajos de investigación en el área del mecanizado eficaz, es el lograr una velocidad de corte cada vez mayor, reducir los costos de producción, sostener o mejorar la calidad superficial y acabado de los productos y disminuir la contaminación del medio ambiente. Los parámetros y recomendaciones a tener en cuenta para tales fines son [4]:

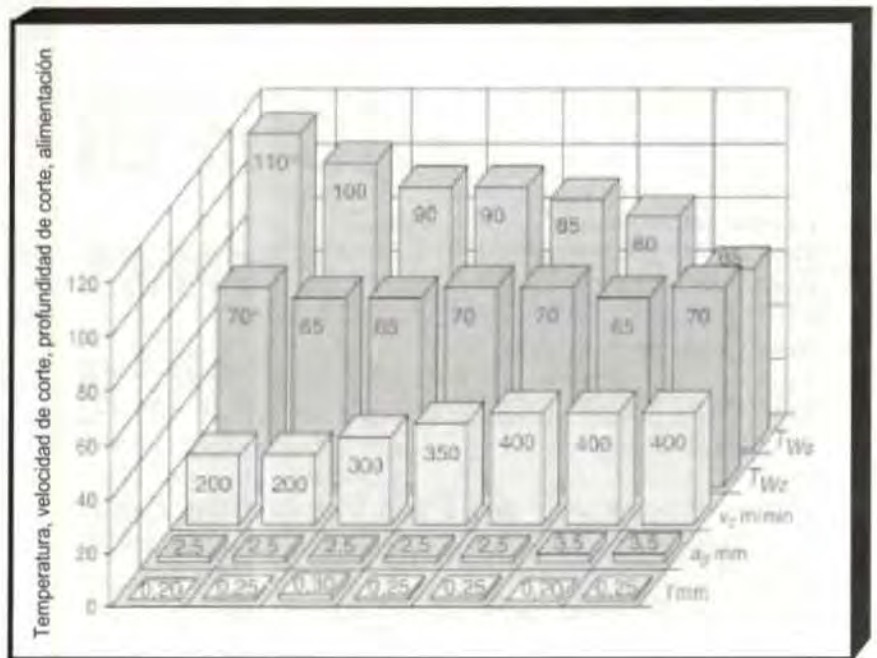


Figura 6. Temperatura de pieza y herramienta en función del porcentaje de desprendimiento de viruta que en el torneado seco (material C45, brillante, 50x80 mm, pieza terminada 20 x 80 mm, volumen removido V 130 cm3, material de corte M25/K20; profundidad de corte y alimentación; Vc velocidad de corte, Tws temperatura de la pieza y Twz temperatura de la herramienta

- El mecanizado en seco de piezas y demás componentes de máquinas y equipos.
- La fabricación de herramientas con materiales cerámicos y puestos que posean alta ° dureza, bajo coeficiente de fricción, gran resistencia al desgaste, suficiente tenacidad y buena estabilidad termo-química.
- El desarrollo de recubrimientos con el tipo de materiales anteriores que sean aplicables a las herramientas de mecanizado.
- Mejoramiento de la adhesión y tenacidad de dichos recubrimientos mediante la tecnología de gradientes de concentración y de multicapas, entre otras.
- Diseño de una geometría que minimice el tiempo y el área de contacto entre la herramienta - pieza - viruta.
- Diseño de sistemas de sujeción y guiado de la herramienta que minimice los esfuerzos que actúan sobre ella.
- En caso necesario incorporar la microrrefrigeración por aire o por goteo, e incorporar canales de refrigeración y lubricación.
- La utilización de un sistema de succión de polvos y virutas durante el proceso de mecanizado.
- El mecanizado con altas velocidades de corte, que disminuyen la temperatura de la herramienta y de la pieza,

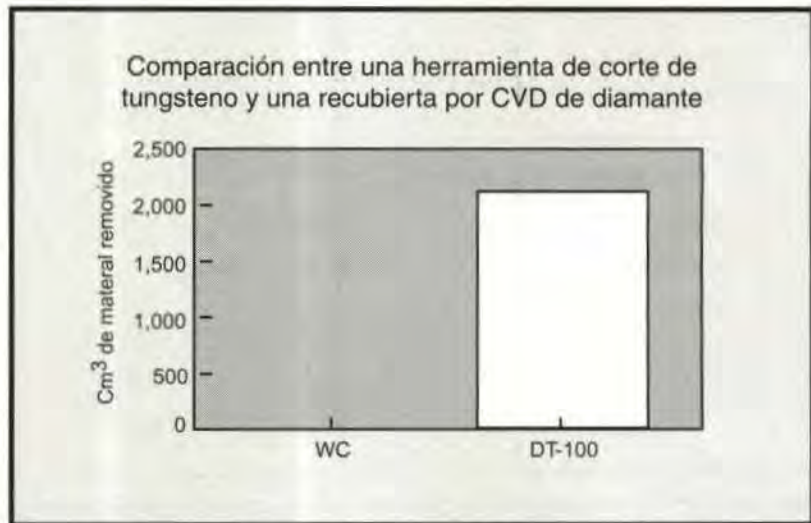


Figura 7. Mecanizado de la aleación de aluminio A356 -T6 con 10% SiC [6]

cuando se utiliza recubrimientos con efecto de barrera térmica y de difusión.

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta la gran dureza y bajo coeficiente de fricción del diamante monofásico y del nitruro de boro cúbico obtenidos por la tecnología del PVD, las actuales investigaciones en el campo de los recubrimientos duros se concentra en la disminución de las tensiones residuales y mejoramiento de la adhesión de dichos recubrimientos, que permitan su aplicación industrial en el proceso del mecanizado eficaz.

**BIBLIOGRAFÍA**

[1] RAYMOND K. Martha. -- Ceramics ease up the machining of high - hardness parts, AMERICAN MACHINIST (Cleveland), Vol. 140, No. 5, mayo 1996, p. 36-39

[2] SCHEDLER Wolfgang, AUFBAU, Herstellung. -- Eigenschaften y industrielle Anwendung einer modernen

Werkstoffgruppe, Handbuch Hartmetall für den Praktiker, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf-Germany, 1988, páginas 1-31.

[3] RINKER U., Christoffel Steinfurt and Klaus. -- Dry machining relieves environmental burdens. -- EUROPEAN PRODUCTION ENGINEERING (Munich), Vol. 20, No. 3-4, pg. 12-14, 1996.

[4] HEINE, Hans J. -- Development work in Germany leads to more frequent use of dry machining methods, FORGING (Cleveland) Vol. 9, No. 4, 1998, p. 39-40

[5] CREES, Dieter. -- Mecanizado de alta velocidad como nuevo método de producción. -- METALURGIA Y ELECTRICIDAD (Madrid), Vol. 64, No. 729, julio - agosto 2000, p. 34-35

[6] RAYMOND K., Martha. -- Coatings keep cutting tools sharp. - AMERICAN MACHINIST (Cleveland) Vol. 140, No. 5, mayo 1996. p. 40-42.