

FRESADO DE ALTA VELOCIDAD DE MOLDES Y MATRICES CON MATERIALES AVANZADOS

Matías Kurtscheidt (Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Universität Kaiserslautern), Aitor Ibañez y Luis N. López de Lacalle (Dpto. de Ing. Mecánica, E.S.I., Universidad del País Vasco)

Resumen

Hasta la fecha la utilización del nitruro de boro cúbico (CBN) como material para herramientas de corte ha encontrado escasa aceptación en el sector de la fabricación de moldes y matrices. Esto se debe principalmente al elevado costo de las herramientas y la fragilidad propia del CBN, además de consideraciones de tipo operativo. Sin embargo a nivel internacional existen numerosas referencias a su uso, y a sus ventajas e inconvenientes.

Estudios anteriores, realizados en distintos materiales de común aplicación en el sector de moldes y matrices confirman las ventajas de las herramientas de CBN en el fresado de alta velocidad. Sin embargo, en la mayoría de estos ensayos las piezas mecanizadas respondían a superficies planas o geometrías muy simples, ajenas a las complejas formas usuales en el sector de moldes y matrices.

El presente trabajo pretende aclarar las áreas en las cuales la utilización del CBN resulta más ventajosa que otros tipos de herramientas y definir las estrategias y los parámetros de corte óptimos para la aplicación de esta tecnología en el fresado de moldes y matrices de geometrías complejas. Con este motivo se han llevado a cabo ensayos de fresado de alta velocidad (FAV) con herramientas de CBN sobre distintos materiales de frecuente aplicación en el sector del molde y la matriz. Se han elegido geometrías a mecanizar que permitan comprobar la estabilidad de las herramientas de CBN en situaciones en que la geometría de la pieza les exige altas prestaciones. Estos ensayos han demostrado que las ventajas del uso de herramientas de CBN en el proceso de MAV en moldes y matrices pueden ser de muy distinta índole:

- Reducción de los tiempos de mecanizado al emplear velocidades de corte superiores.
- Obtención de una superficie con mejores propiedades en cuanto a rugosidad y las tolerancias, con la consecuente reducción de las tareas a realizar después del mecanizado (por ejemplo el pulido manual).
- Prolongación de la vida útil de la herramienta.
- Mecanizado realizado en seco evitando costos de líquido refrigerante y posibles problemas medioambientales.

La descripción de estos ensayos, el análisis de los mismos y las conclusiones resultantes conforman el presente trabajo.

1. Introducción

El presente estudio ha sido realizado durante el primer semestre del año 2000, en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior de Ingenieros de Bilbao, en el marco del programa de colaboración entre la Universidad del País Vasco (U.P.V) y la Universidad de Kaiserslautern, Alemania.

Hoy en día el uso de programas de CAD/CAM y de máquinas para el mecanizado de alta velocidad (MAV) es indispensable para cualquier empresa del sector que quiera afianzar su posición en el mercado ^[1]. Las modernas máquinas de mecanizado se complementan con las herramientas de corte de última generación. Para un aprovechamiento pleno de la máquina es necesario una herramienta con las características indicadas y viceversa. El resultado de esta simbiosis es una producción más ágil y económica.

Al determinar la eficiencia de los materiales para herramientas de corte, las propiedades más importantes son la resistencia al desgaste abrasivo, la tenacidad y la máxima temperatura soportada. La resistencia al desgaste abrasivo es básicamente una función de la dureza. En este aspecto el diamante policristalino (PCD) y el nitruro de boro cúbico (CBN) son muy superiores a todos los demás materiales de corte conocidos ^[2]. Aún considerando que el CBN es un material de corte relativamente frágil, tiene mayor tenacidad que las cerámicas. Su gran ventaja frente al diamante está en que no posee una afinidad al carbono. Esto permite su aplicación en fundiciones y aceros de alta dureza, materiales no aptos para el mecanizado con herramientas de diamante pero que suponen casi la totalidad de los mecanizados en el sector de moldes y matrices.

A pesar de que la utilización del CBN como material de corte es conocida desde hace más de dos décadas ^[3], aún no ha encontrado una amplia aceptación en el sector de la fabricación de moldes y matrices. Esto tiene principalmente dos razones:

- Los altos costos de las herramientas de CBN.
- La sensibilidad del CBN a interrupciones en el proceso de mecanizado que pueden llevar a la rotura de la herramienta.

Aunque estos dos argumentos son innegables, también hay que considerar que en la industria del molde y la matriz los tiempos de mecanizado suelen ser prolongados y los costos de las herramientas juegan un papel secundario. La probabilidad de rotura de las herramientas de CBN puede ser minimizada mediante la optimización del proceso de mecanizado. Aplicando

una secuencia de mecanizado acorde a los requerimientos del CBN y los parámetros de corte correctos, la vida útil de una herramienta de CBN es superior a la de una herramienta convencional. Estas características del CBN tienen como consecuencia que su empleo en herramientas de corte para el MAV lleve a mejoras en el proceso de mecanizado. La optimización del mecanizado lleva a que operaciones posteriores como el pulido manual se reduzcan y todo el proceso de fabricación del molde o la matriz se lleve a cabo en un tiempo menor, teniendo como consecuencia final una reducción de los costos de fabricación

El presente trabajo pretende aclarar las áreas en las cuales la utilización del CBN resulta más ventajosa que otros tipos de herramientas y definir las estrategias y los parámetros de corte óptimos para la aplicación de esta tecnología en el fresado de moldes y matrices. Con este motivo se han llevado a cabo ensayos de fresado de alta velocidad (FAV) con herramientas enterizas de CBN de punta esférica sobre fundiciones del tipo laminar (GG25CrMo) y nodular (GGG70L) así como aceros endurecidos (Orvar Supreme de una dureza de 53 HRC). El mecanizado de estos materiales, de frecuente aplicación en el sector del molde y la matriz, ha sido realizado en el Taller Mecánico del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingenieros de Bilbao. La descripción de estos ensayos, el análisis de los mismos y las conclusiones resultantes conforman el presente estudio.

2. Aspectos generales del fresado de alta velocidad

Según H. Schulz ^[4], se entiende bajo fresado de alta velocidad (FAV) el proceso que hace uso de medios y métodos específicos de fresado caracterizados por una velocidad de cinco a diez veces superior a la de medios y métodos de fresado convencionales. Esta definición se basa en los resultados obtenidos en el fresado de distintos materiales variando la velocidad de corte hasta conseguir un mecanizado óptimo. Un mejor acercamiento a este concepto ha sido realizado por Echepare y Esteban en ^[1]. La figura 1 muestra distintos factores del proceso de mecanizado en función de la velocidad de corte.

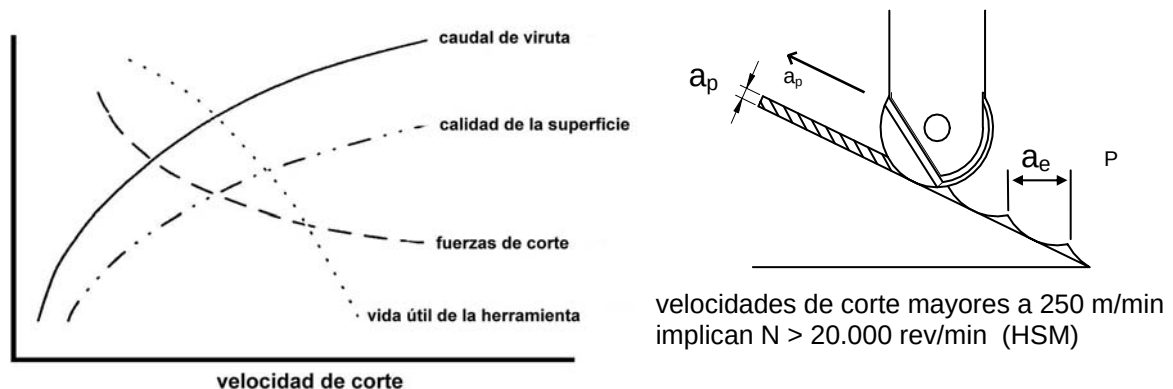


Figura 1: Características del mecanizado de alta velocidad ^[5].

En los años 90 el FAV se convierte en una tecnología que deja de ser únicamente un objeto de investigación académica para lograr su inserción en la industria. Solo pocos años antes, a principios de los 80, las posibilidades de éxito que se le conferían al FAV eran muy limitadas ya que se preveía que las altas velocidades de corte iban a llevar a un desgaste prematuro de las herramientas, haciendo poco rentable esta tecnología ^[5]. Sin embargo el desarrollo de las herramientas de corte (CW con recubrimientos, CBN, PCD) ha terminado negando esta predicción contribuyendo en gran medida al éxito del FAV. Hoy en día las ventajas del FAV están fuera de discusión ^[1, 8, 12]. Esta tecnología ha encontrado una gran aceptación en la industria a la vez que posee un enorme potencial de crecimiento.

3. Grado de aplicación actual del fresado de alta velocidad en la industria de moldes y matrices

El FAV en la industria del molde y la matriz ha sido posible mediante la veloz evolución de la tecnología de los materiales de corte y la compresión de los procesos de corte entre la herramienta y la pieza ^[6]. En el fresado de alta velocidad de aceros y fundiciones el desgaste de la herramienta aumenta con respecto al desgaste a velocidades convencionales. Con la reducción del ancho de corte a_e y la profundidad de corte a_p , la vida útil de la herramienta es prolongada significativamente. Esto hace que la aplicación del fresado de alta velocidad en aceros y fundiciones en la mayoría de los casos tenga sentido en las operaciones de semiacabado, acabado y superacabado. El desbaste de este tipo de materiales debería realizarse en centros de mecanizado de menor velocidad y mayor potencia. Sin embargo la evolución de la máquina-herramienta puede hacer que en un futuro cercano sea corriente el desbaste en máquinas de alta velocidad, ya que la industria de la máquina-herramienta piensa llegar a poder aumentar de manera considerable la potencia de corte a altas rotaciones del husillo ^[7]. La aplicación del FAV en el acabado de moldes y matrices puede perseguir dos finalidades bien diferenciadas ^[8]:

- El propósito de la aplicación del FAV no es la reducción de los tiempos de mecanizado. Debido a que las velocidades de avance pueden llegar a ser de 5 a 10 veces superiores se brinda la posibilidad de aumentar en igual medida el número de pasadas. El resultado es una superficie de mayor calidad, reduciendo trabajos manuales de pulido posteriores.
- El propósito de la aplicación del FAV es una reducción de los tiempos de mecanizado. Esto significa que la distancia entre pasadas es mantenida constante. Debido a las velocidades de avance superiores, el tiempo de mecanizado se reduce.

En la aplicación práctica es necesario encontrar el punto óptimo entre estas dos filosofías de trabajo basándose en los costos y la ocupación de las

máquinas. La experiencia demuestra que en las empresas de fabricación de moldes y matrices se suele optar por una mejora de la calidad superficial [9, 18].

Otro aspecto importante del FAV es la posibilidad de ofrecer una alternativa a la electroerosión (EDM). Esto puede suponer ahorros importantes en cuanto a costos y tiempos de fabricación. Con el objetivo de establecer una comparación directa de los tiempos de mecanizado entre el FAV y la técnica de la electroerosión en piezas representativas se han llevado a cabo ensayos en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la U.P.V en colaboración con la Escuela Politécnica Superior de Mondragón Universitatea. La figura 2 muestra los resultados de dichos ensayos.

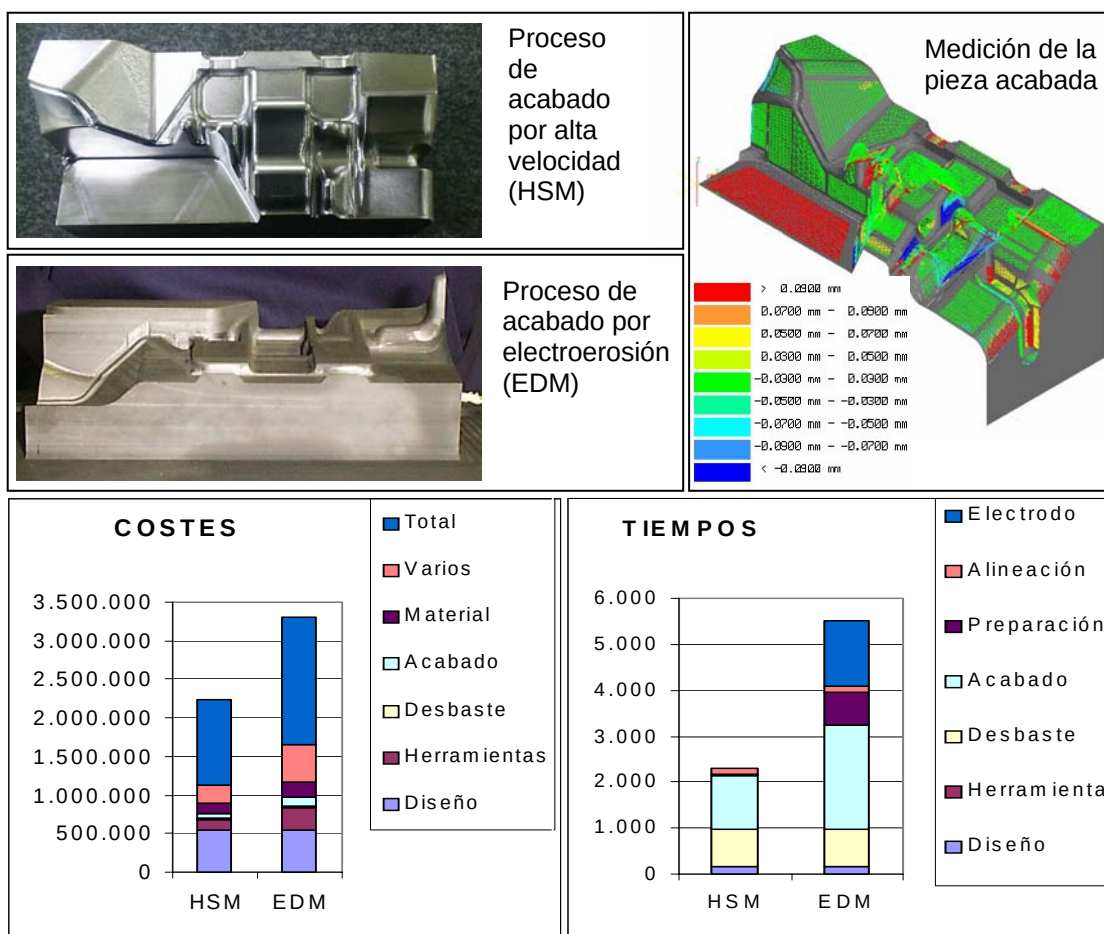


Figura 2: Resultados del estudio de comparación de costes y tiempos entre el proceso con acabado a alta velocidad (HSM) y el acabado con electroerosión (EDM) realizado en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la U.P.V. en colaboración con la Escuela Politécnica de Mondragón.

La aplicación del FAV en la industria del molde y la matriz se centra en:

- Mecanizado de aceros y fundiciones, especialmente en las operaciones de semiacabado, acabado y superacabado. El desbaste a alta velocidad está hoy en estudio y discusión.

- Mecanizado completo (desde desbaste a superacabado) de electrodos de cobre y grafito para la electroerosión.
- Fabricación de Prototipos de aluminio.
- Fabricación de modelos.

La elección de la estrategia de mecanizado apropiada es de suma importancia para que el proceso de mecanizado se desarrolle de forma satisfactoria. Siempre que la geometría de la pieza lo permita es necesario confeccionar una estrategia de mecanizado en la que:

- El ángulo de inclinación de la herramienta sea de aproximadamente 15° con respecto a la normal de la superficie de la pieza, evitando de esta forma el corte con las zonas de $v_c = 0$.
- La inclinación de la herramienta se realice en sentido paralelo al avance y en corte ascendente.
- El corte se realice en concordancia.
- El mecanizado se realice en seco o de no ser posible con asistencia de micropulverización de aceite.

Con el uso de programas de mecanizado virtual (Vericut, NCsimul, NCverify...) complementando el sistema de CAM, es posible eliminar costosas pruebas en la máquina en polietileno expandido. Con la simulación en el ordenador es posible ahorrar tiempo, energía y detectar los fallos con mayor facilidad.

4 Herramientas de nitruro de boro cúbico (CBN)

A nivel mundial la mayoría de las herramientas de corte utilizadas en los procesos de mecanizado son herramientas de metal duro recubiertas. Figura 3 muestra la utilización porcentual de los distintos materiales de corte excluyendo los aceros rápidos (HSS) en 1998 así como las predicciones para el año 2005. Se observa que la utilización del CBN se duplicará hasta el año 2005.

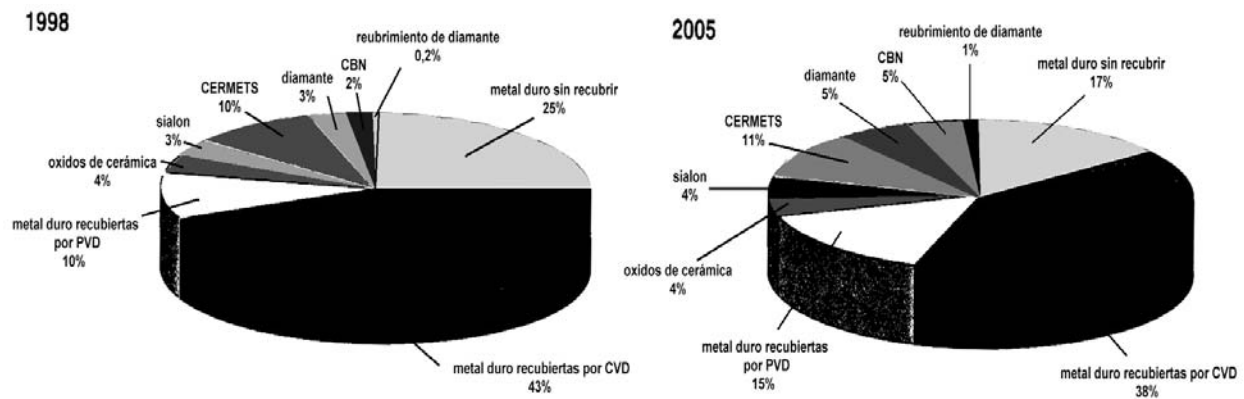


Figura 3: Utilización porcentual de los distintos materiales de corte ^[10].

El CBN es después del diamante el material de corte más duro conocido por el hombre y entre sus características se destaca el hecho de que la disparidad entre dureza y ductilidad común a la mayoría de los materiales es menos pronunciada ^[11]. El CBN cuenta con otras características que ofrecen ventajas para su empleo en herramientas de corte:

- El límite de estabilidad termoquímica del CBN se encuentra en 1200° C, muy por encima de la de otros materiales empleados en herramientas de corte como el diamante policristalino situada a 700° C.
- Debido a su alta dureza la vida útil de las herramientas de CBN es mucho mayor que las de TiN, TiAlN, TiCN etc.
- Aplicando herramientas de CBN los mejores resultados se obtienen a altas temperaturas de corte por lo que el proceso es realizado en seco, lo que supone la eliminación de costos de refrigeración y se evitan posibles problemas medioambientales.

Algunas limitaciones en cuanto a la temperatura surgen en el mecanizado de aceros austeníticos y fundiciones con alto contenido de ferrita (Fase alfa, gama, delta llevan a un desgaste químico) ^[12]. Según P. Fallböhmer, esto probablemente se debe a fenómenos de difusión entre el CBN y partículas de carbono en la ferrita bajo determinadas condiciones de corte ^[13].

Debido a su alta dureza a altas temperaturas (Figura 4 izq.) y su mínima tendencia a difusiones y adhesiones, el CBN ofrece los requisitos previos óptimos para la introducción del mecanizado en seco. El mecanizado se realiza en seco ya que a altas temperaturas se obtiene un mejor rendimiento del CBN. A pesar de que el uso de fluidos refrigerantes puede tener ventajas en cuanto a las condiciones en el área de corte debido a que cumple una función lubricante reduciendo el rozamiento entre herramienta y pieza, también lleva a un aumento de las fluctuaciones térmicas elevando las posibilidades de fallo por

ruptura de la herramienta ^[14]. Además se ha comprobado que el uso de sustancias refrigerantes puede producir una reacción química entre el CBN y las sales del agua de la emulsión que conduce a un ataque del filo de la herramienta ^[15, 19] y su descomposición en ácido bórico y CO₂. La eliminación de sustancias refrigerantes conlleva a una reducción de costos y la eliminación de posibles problemas medioambientales.

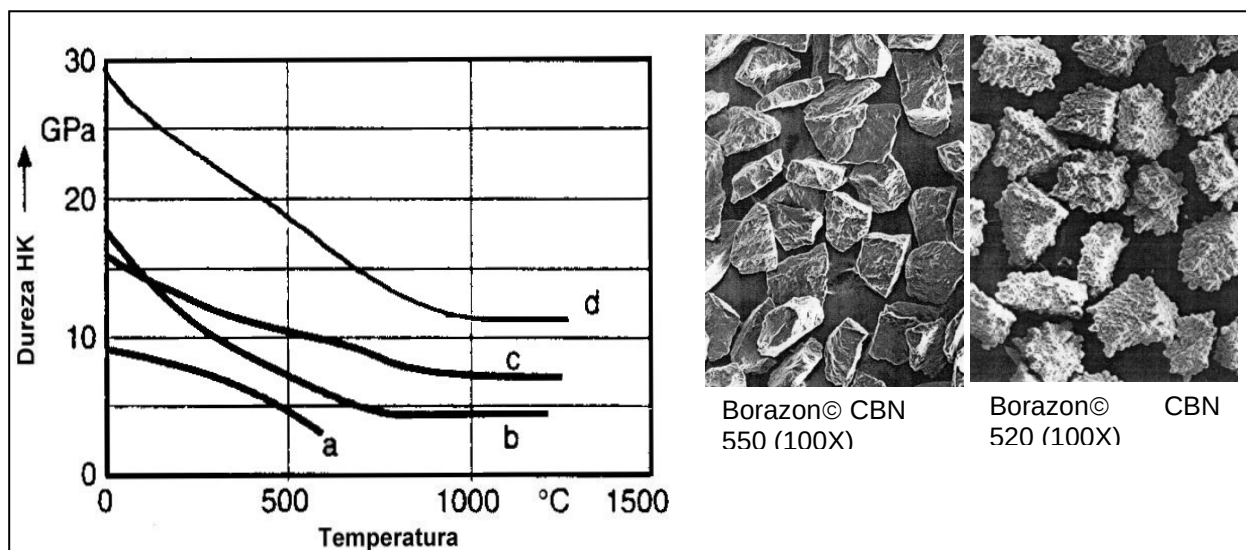


Figura 4 izq.: Dureza Knoop de distintos materiales de corte en función de la temperatura ^[11]. a) acero endurecido, b) metal duro, c) cerámica, d) CBN. Figura 4 der.: Morfología de distintos tipos de granos de CBN ^[2].

La obtención del CBN se realiza por sinterizado en dos etapas a temperaturas de 1000° C y presiones de 7 a 9 GPa. Los granos del CBN utilizados en las herramientas de corte tienen un diámetro de 0.5 µm a 3 µm y se encuentran unidos por una sustancia aglutinante de tipo metálico a base de Ni/Co o TiN. El resultado es un material policristalino, idóneo para herramientas de corte. Según la aplicación, el contenido de granos de CBN dentro del material de corte puede variar del 40% al 90%. El material de corte con menor contenido de CBN (40-50%) es recomendado para el acabado de aceros endurecidos mientras que el material de corte con mayor contenido de CBN es recomendado para el acabado de fundiciones. Existen a nivel mundial únicamente tres proveedores de CBN para herramientas de corte:

- General Electric Superabrasives (producto: Borazon®)
- De Beers Industrial Diamond Division (producto: Amorbite®)
- Sumitomo Electric (producto: Sumiboron®)

Los fabricantes de herramientas hacen uso del CBN de alguno de estos tres proveedores en sus herramientas. Es de gran importancia tener en cuenta que un mismo fabricante de herramientas puede variar de CBN a lo largo del tiempo ^[18].

El mecanizado de alta velocidad con herramientas de CBN ha encontrado mayor aceptación en el torneado que en el fresado. Esto se debe a que en el torneado el corte es continuo y las fuerzas de corte suelen ser más homogéneas que en el fresado, lo que disminuye las posibilidades de rotura de la herramienta. Esto ha llevado a que sea dentro del campo del torneado donde el CBN ha demostrado de manera más evidente su superioridad frente a otras herramientas de corte ^[16]. No obstante, teniendo en cuenta los requerimientos de este tipo de herramientas, las ventajas obtenidas en el torneado son transferibles al fresado.

5 Grado de uso de herramientas de CBN en el fresado de moldes y matrices

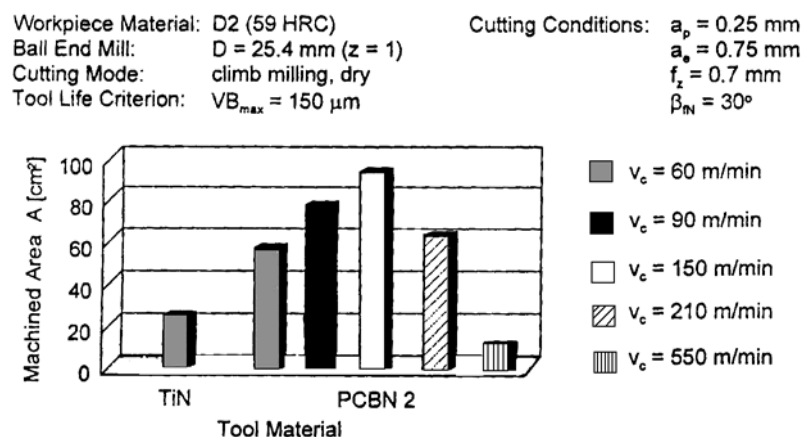
Para aprovechar las ventajas que brinda el FAV es necesaria la elección adecuada de las herramientas, de la estrategia de mecanizado y de los parámetros de corte. A través de ensayos científicos, experiencias en el sector industrial e informaciones de los fabricantes de herramientas, se desprende que el uso de herramientas de nitruro de boro cúbico (CBN) en el FAV puede llevar a un rendimiento muy superior que mediante el uso de herramientas de metal duro recubiertas, cerámicas o cermets en el mecanizado de aceros endurecidos y fundiciones para moldes y matrices. Si bien es cierto que las herramientas de CBN tienen un coste inicial más elevado que las herramientas convencionales, hay que considerar que lo significativo no es el coste de la herramienta, sino *el coste total de toda la operación de fabricación*. El objetivo es reducir los tiempos de fabricación totales, no específicamente los tiempos de mecanizado.

El uso de herramientas de CBN en el sector de la fabricación de moldes y matrices español es escaso. Las pocas empresas que han empleado esta tecnología ^[18] informan sobre resultados muy dispares. En algunos casos, como en el acabado de troqueles de estampación en fundición laminar (GG25), la vida útil de la herramienta de CBN ha sido cinco veces superior a la de una herramienta convencional (metal duro recubierta de TiAlN). Estos buenos resultados contrastan con los de otras empresas en donde la vida útil de las herramientas de CBN ha sido menor que en el caso de las herramientas convencionales, principalmente debido a la fragilidad del CBN en cortes interrumpidos y fuerzas de corte heterogéneas. Sin embargo, es necesario aclarar que en muchos casos los resultados poco satisfactorios se deben a que no se han tenido en cuenta los requerimientos que implica el uso de un material con las propiedades del CBN. Para aumentar las posibilidades de éxito se deben tener en cuenta una serie de factores que responden a las exigencias del uso del CBN como material de corte (Figura 5).

Factores		Probabilidad de éxito del FAV con herramientas de CBN		
		Alta	Media	Baja
Material		Cantidad de ferrita libre menor al 5% → Cantidad de ferrita libre mayor al 10%		
Máquina	Revoluciones del husillo	Máquina de alta velocidad → Máquina de velocidades convencionales		
	Grados de libertad	5 grados de libertad simultáneos → 3 + 2 grados de libertad	→ 3 grados de libertad simultáneos	
Refrigeración		seco → micropulverización de aceite → taladrina		
Proceso	Trayectoria	continua → interrumpida		
	Estrategia	herramienta inclinada en sentido paralelo al avance y corte ascendente en concordancia. → corte con la punta de la herramienta		
	Prog.CAD/CAM	CNC depurado y optimizado → CNC sin depurar ni optimizar		
	Simulación y optimización virtual	control de avance para una sección de viruta constante → avance escalonado		
Geometría		grandes superficies de baja complejidad → pequeñas superficies de gran complejidad y cavidades		

Figura 5: Factores a considerar en el FAV con herramientas de CBN en moldes y matrices

Ensayos de fresado en línea realizados en fundiciones (GG35) y aceros endurecidos (Wnr. 1.2379, D2, dureza 59 HRC), materiales de frecuente aplicación en la fabricación de moldes y matrices, muestran las diferencias de la vida útil de los distintos grupos de herramientas ^[12]. La figura 6 muestra los resultados de estos ensayos.



Para los ensayos de superacabado en fundiciones se ha elegido una pieza del sector de la embutición, destinada a la estampación de carrocerías de automóviles. Esta pieza cuenta con la dificultad de poseer un nervio transversal de paredes verticales y cavidades en donde la herramienta está exigida a cortar con la punta (Figura 7). Debido a que los ensayos fueron realizados en una máquina de alta velocidad de tres grados de libertad simultáneos (X, Y, Z), se empleó una mesa de senos con una inclinación de 15° a fin de evitar que la herramienta corte con la punta en las superficies planas. Simulando de esta manera un cuarto grado de libertad (no simultáneo) se pueden mejorar las probabilidades de éxito del CBN, siempre que la geometría de la pieza lo permita.

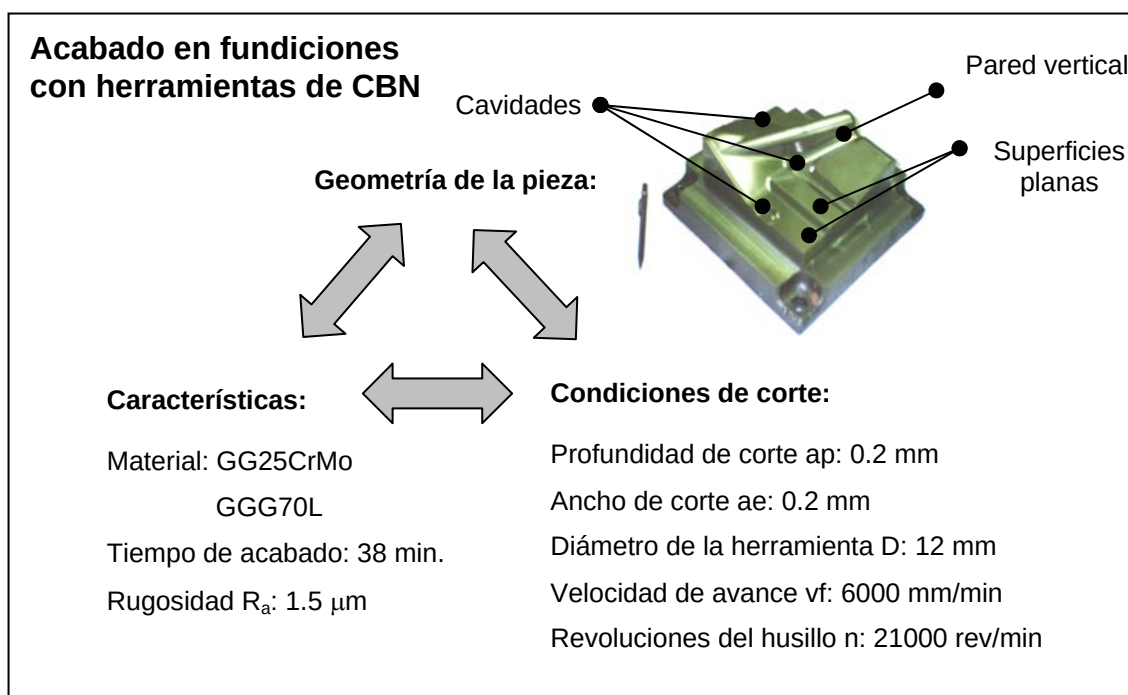


Figura 7: Pieza del sector de la embutición (diseño cedido por Matrici, Soc. Coop.), elegida para el superacabado con herramientas de CBN en fundiciones.

Para los ensayos de superacabado en aceros endurecidos se ha elegido un molde de inyección de termoplásticos destinado al sector automotriz. Esta pieza cuenta con cavidades estrechas y radios muy pequeños (Figura 8). En la actualidad esta pieza es fabricada por electroerosión. Las exigencias en cuanto a la calidad superficial en el sector de los moldes para inyección de plásticos suelen ser muy altas por lo que el pulido manual en este tipo de piezas es frecuente. Mediante la aplicación del fresado con CBN en el proceso de superacabado de esta pieza se pretende establecer las posibilidades del acabado con CBN como alternativa a la electroerosión.

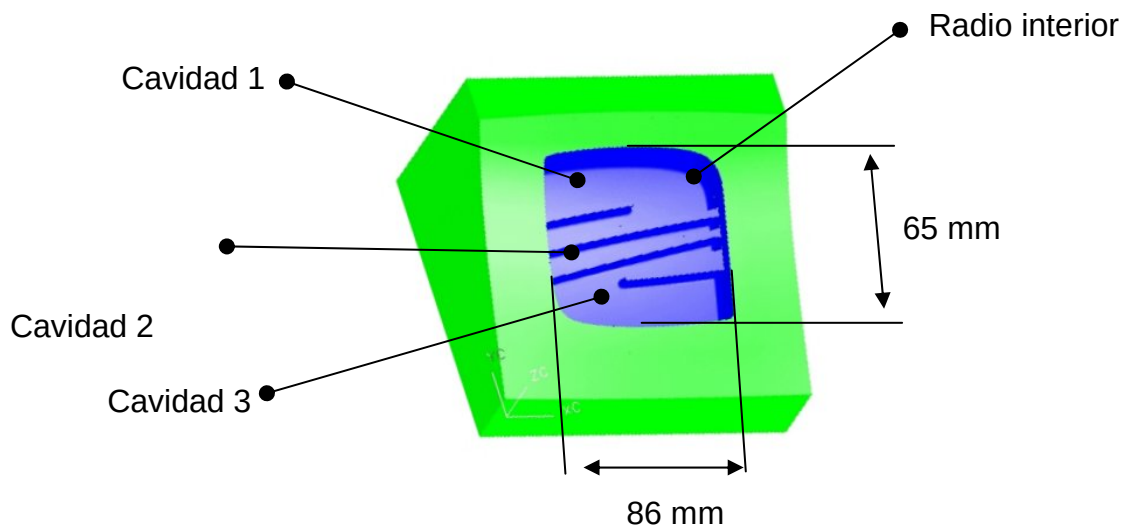


Figura 8: Pieza del sector de moldes para la inyección de plásticos, elegida para el superacabado con herramientas de CBN en aceros endurecidos.

6.1 Superacabado en fundiciones

El mecanizado de fundiciones es la principal operación a realizar en la fabricación de matrices de embutición para la producción de carrocerías de automóvil, es decir, en el sector de la matricería. En este sector se suele hacer uso de dos tipos de fundiciones (Figura 9):

6.1.1 Superacabado en GG25CrMo

El estudio metalográfico realizado en este material, a fin de comprobar la cantidad de ferrita libre, indica que la misma ronda el 1 %. Esto quiere decir que el material es apto para un mecanizado con CBN. La dureza de este material es de 220 HB.

La operación de semiacabado fue realizada en diagonal, dejando una demasía de 0,2 mm. Con el fin de evitar un cruce con las pasadas del semiacabado, lo que llevaría a mayores fluctuaciones en las fuerzas de corte, el superacabado se realizó en la misma dirección. Los parámetros empleados fueron:

- Profundidad de corte a_p : 0.2 mm
- Ancho de corte a_e : 0.2 mm
- Diámetro de la herramienta D: 12 mm
- Velocidad de avance v_f : 6000 mm/min (no bajó de 4500 mm/min)
- Revoluciones del husillo n : 21000 rev/min
- Tiempo de mecanizado t : 38 min.

La comparación directa con el superacabado de la misma superficie con una herramienta convencional de TiAlN demostró que el tiempo de mecanizado empleando la herramienta de CBN se redujo en un 54%, logrando además una calidad de la superficie superior. Debido a al tamaño relativamente pequeño de

la superficie no fue posible constatar un desgaste de la herramienta de CBN mientras que en la herramienta de convencional el desgaste era visible.

6.1.2 Superacabado en GGG70L

A pesar de tratarse de un material provisto de una mayor dureza (HB 270), el superacabado se realizó aplicando los mismos parámetros de corte que en el GG25CrMo sin que esto llevase a algún tipo de cambio en el proceso de mecanizado. Previamente el estudio metalográfico reveló que la cantidad de ferrita libre en este material está situada dentro de los rangos requeridos por el CBN. (aproximadamente 6%). Los resultados fueron igualmente positivos como en el caso anterior. El superacabado se realizó con dos herramientas de CBN de distinta procedencia a fin de comparar de forma directa la calidad de la superficie mecanizada en cada caso. Las diferencias en cuanto a la rugosidad superficial eran claramente visibles. Este hecho se debe a la diferencia entre la herramienta entera y la de la herramienta de cabeza intercambiable.

6.2 Superacabado en aceros endurecidos

Los aceros endurecidos son empleados habitualmente en el mundo del molde y la matriz. Entre las aplicaciones más representativas encontramos las estampaciones de matrices, forjas e inyección de moldes de plástico. A este último sector pertenece la pieza elegida y arriba mencionada.

El mecanizado de esta pieza exige, para los distintos pasos en el proceso de mecanizado, cuatro diámetros diferentes de herramienta ($\varnothing 12$, $\varnothing 6$, $\varnothing 3$ y $\varnothing 1,5$ mm). A fin de establecer una comparación directa entre las superficies acabadas con herramientas de CBN y las superficies acabadas con herramientas de metal duro con recubrimiento de TiAlN, el mecanizado de las cavidades se ha realizado con distintas herramientas. La cavidad 1 fue acabada con una herramienta de $\varnothing 6$ mm mientras que las cavidades 2 y 3 fueron mecanizadas con herramientas de metal duro de $\varnothing 6$ y $\varnothing 3$ mm.

Para los radios interiores de dimensiones pequeñas hubo que hacer uso de una herramienta de metal duro de 1,5 mm de diámetro debido a que los fabricantes de herramientas de CBN no ofrecen diámetros menores a 6 mm de las mismas. La obtención de herramientas de CBN de diámetros inferiores es posible únicamente bajo pedido con los consecuentes largos plazos de entrega (alrededor de 4 meses).

Los parámetros de las operaciones de acabado de la pieza fueron los siguientes:

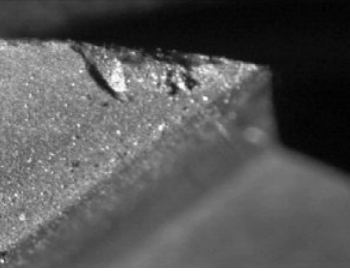
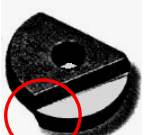
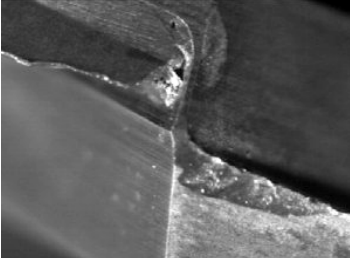
- Profundidad de corte a_p : 0.2 mm
- Ancho de corte a_e : 0.2 mm
- Velocidad de corte periférica, $V_c = 1000$ m/min
- Avance por diente f_z : 0.15 m/diente
- Revoluciones del husillo n : 24000 rev/min

Todas las operaciones, tanto las de desbaste como las de acabado, fueron realizadas en seco.

Una vez realizado el mecanizado de la pieza, ésta fue medida en la máquina de medir por coordenadas, resultando la pieza dentro de las tolerancias exigidas. Así mismo, se obtuvo un buen acabado superficial. En cuanto al desgaste de las herramientas, en el caso de las herramientas de metal duro éstas sufrieron un leve desgaste mientras que en las herramientas de CBN no se apreció desgaste alguno. En ensayos previos en herramientas de metal duro con recubrimiento de TiAlN el desgaste observado fue de $VB = 0,12 \text{ mm}$.

6.2 Desgaste de las herramientas de CBN

A fin de comprobar el desgaste en herramientas de CBN después de su uso prolongado, se analizaron plaquitas intercambiables de CBN cedidas por la empresa Talleres Oran S. A., de Santander. Estas herramientas habían sido utilizadas previamente para el superacabado de matrices de estampación (de GG25) destinadas al sector automotriz. Este tipo de matrices se caracteriza por sus grandes dimensiones y largos tiempos de acabado, siendo propicio para comprobar el desgaste de las herramientas ya que este proceso de mecanizado suele estar exento de interrupciones. La figura 10 muestra el desgaste en tres de estas plaquitas.

Condiciones de corte	Herramienta	Vida útil	Desgaste del filo	Observaciones.
 Ø 16mm	Plaquita nº1  imagen A	38 hs.	 imagen A	Desgaste por rotura del filo
	Plaquita nº2  imagen B	35 hs.	 imagen B	Desgaste por rotura del filo

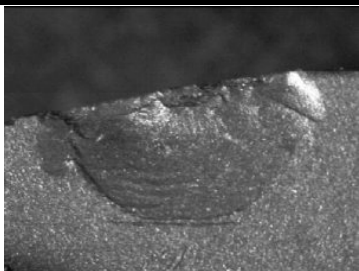
a_p : 0,2 mm a_e : 0,32 mm rpm: 20.000 v_f : 10 m/min en fundición GG25	Plaquita nº3  imagen C	12 hs.	 imagen C	Desgaste por rotura del filo
--	---	--------	--	---------------------------------

Figura 10: Desgaste de plaquitas de CBN

Llama la atención que el desgaste del filo es muy irregular. Entre las roturas del filo no se observa desgaste alguno, muestra de la gran resistencia del CBN al desgaste abrasivo. La fractura principal suele encontrarse en los tres casos cerca de la punta, allí donde las velocidades de corte se acercan a $V_c = 0$. Esto vuelve a remarcar el hecho de que en la programación de las estrategias de fresado se debe prestar especial atención en evitar, siempre que la geometría de la pieza lo permita, el corte con la punta de la herramienta, ya que allí se encuentra el punto más débil de la herramienta.

7 Conclusiones

Los ensayos de superacabado llevados a cabo en fundiciones y aceros endurecidos sobre geometrías complejas con herramientas de CBN han llevado a resultados satisfactorios. No se ha producido en ninguno de los casos una fractura del filo de la herramienta, a pesar de que la geometría de la pieza exponía a las herramientas de forma inevitable a fuerzas de corte discontinuas. Las ventajas del acabado con herramientas de CBN en el sector de moldes y matrices se pueden definir de la siguiente manera:

- Reducción de los tiempos de mecanizado al emplear velocidades de corte superiores.
- Obtención de una superficie con mejores propiedades en cuanto a la rugosidad y las tolerancias.
- Prolongación de la vida útil de la herramienta reduciendo las interrupciones del proceso de mecanizado por sustitución de la herramienta. Esto conlleva a una disminución de la probabilidad de marcas en la superficie de la pieza ocasionados por la rotura de la herramienta.
- Reducción de las tareas a realizar después del mecanizado (por ejemplo el pulido manual).
- Mecanizado realizado en seco evitando costos de líquido refrigerante y posibles problemas medioambientales.

En todo caso cabe destacar que: el uso del CBN, herramienta de elevadas prestaciones, se justifica cuando se ha resuelto etapas previas de optimización del proceso de fresado y asegurado unas condiciones de corte estables. En este momento el CBN puede ser un salto cualitativo/cuantitativo respecto a herramientas de metal duro con TiAlN.

Agradecimientos

La obtención de información relativa al aspecto industrial de este trabajo fue posible gracias a la colaboración de distintas personas del sector de la industria del molde y la matriz que nos han transmitido sus experiencias, apreciaciones e inquietudes. Queremos agradecer a Javier Irazabal y Eduardo Abaunza (Maier Technology Centre, S. Coop., Guernika), Vicente Sánchez (Matrici, S. Coop., Zamudio), A. Varela (Matricería Nervión, S. L., Barakaldo), Miguel Angel González y Raúl Alvarez (Talleres Oran, S. A., Santander) y Peter Fallböhmer (BMW, München, Alemania) por dedicar parte de su costoso tiempo en colaborar con este trabajo. Además queremos agradecer la asistencia técnica de Eduardo Sasía Boya (Responsable del Taller Mecánico de la U.P.V., Bilbao) y de Javier González Martínez (Dpto. de Metalurgia, U.P.V., Bilbao). La elaboración de la pieza de la figura 2 ha sido realizada en colaboración con Patxi Aristimuño del M.E.P.

8 Referencias

- [1] L. N. López de Lacalle, R. Urizar (Ed.), "Fresado de alta velocidad / proceso, máquinas y aplicaciones", Ediciones Técnicas Izaro, 1999
- [2] General Electric Superabrasives "Polycrystalline products for machining applications" publicación comercial 1991
- [3] S. Kukino, T. Harada, T. Fukaya, J. Shiraishi y T. Nakai, "Gehärteten Stahl hart hochgeschwindigkeits- und hochpräzisionszerspanen", Werkstatt und Betrieb 9 (1999), pág. 32-39
- [4] H. Schulz, "Hochgeschwindigkeitsfräsen metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe", Carl Hanser Verlag, München, 1989
- [5] H. Schulz, "Hochgeschwindigkeitsbearbeitung / High Speed Machining", Carl Hanser Verlag, München, 1996
- [6] K. Fritsche y N. Glatthor "HSC-Fräsen im Formenbau" Die Bibliothek der Technik Band 149, Verlag Moderne Industrie, 1997
- [7] H. Schulz, "HSC contra HVM" Werkstatt und Betrieb, HSC Sonderteil (1999), pág. 4
- [8] H. Schulz, "Hochgeschwindigkeit - typisch für neue Technologien in Japan und Deutschland", Form und Werkzeug, 8 (1993), pág. 68-70
- [9] U. Brüggemann, "Erfahrungen beim HSC Fräsen", Werkstatt und Betrieb 10 (1995), pág. 906-908
- [10] M. F. Huston y G. W. Knobloch, "Hochleistungswerkzeuge", VDI Berichte Nr. 1399, VDI-Verlag, Düsseldorf 1998, pág. 43
- [11] M. Klinger, "Grauguß mit CBN statt Keramik bearbeiten", Werkstatt und Betrieb, 129 (1996), pág. 350
- [12] P. Fallböhmer, "Advanced cutting tools for the finishing of Dies and Molds", Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 498, VDI Verlag 1998
- [13] P. Fallböhmer, "Re: HSM von Grauguss mit CBN", correo electrónico del 03.02.2000
- [14] D. Huddle, "Is there a PCD/PCBN insert in your future?", Manufacturing Engineering 7 (1998), pág. 98-104

- [15] L. N. López de Lacalle, J. Pérez-Bilbatua, J. A. Sanchez, J. I. Llorente, A. Gutiérrez y J. Albóniga, "Using High Pressure Coolant in the Drilling and Turning of Low Machinability Alloys", Int. J. Advanced Manufacturing Technology, 16:85-91, 2000, pág.
- [16] N. Winands, "Leistungspotentiale in der Zerspanung ausschöpfen", Werkstatt und Betrieb 12 (1999), pág. 68-71
- [17] M. A. Elbestawi, L. Chen, C. E. Becze, T.I. El-Wardany, "High-Speed Milling of Dies and Molds in their Hardened State", Annals of the CIRP Vol. 46/1/1997, pág. 57-62
- [18] Conversación con responsables de Matrici Soc. Coop, Maier Technology Centre Soc. Coop., Talleres Nervión S. L., Talleres Oran S. A., año 1999 y 2000
- [19] L. N. López de Lacalle, A. Gutiérrez, A. Lamikiz, "Turning of Thick Thermal Spray Coatings", Journal of thermal Spray Technology, a publicarse en noviembre de 2000