

**RESISTENCIA A FRACTURA DE CARBUROS CEMENTADOS (WC-Co):  
INFLUENCIA DEL ACABADO SUPERFICIAL**

L. Llanes, E. Idañez, M. Marsal, A. Mateo y M. Anglada  
Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica,  
ETSEIB., Universitat Politècnica de Catalunya, 08028 Barcelona

**Resumen.** En esta investigación se evalúa la resistencia a rotura transversal de un carburo cementado WC-Co con distintos acabados superficiales. Las condiciones estudiadas, correspondientes a diferentes procesos de mecanizado: corte, desbaste y pulido utilizando diamante como abrasivo, y electroerosión, se caracterizan en términos de la rugosidad y la integridad superficial implícita a cada una de ellas. Considerando que la rotura está relacionada con defectos introducidos en el material, bien durante el proceso de elaboración de las muestras o en el proceso de mecanizado, se lleva a cabo un estudio fractográfico para discernir el origen de la rotura. Finalmente, el valor medio y la dispersión evaluados para la resistencia a fractura de cada condición son discutidos y analizados, en el marco de la mecánica de la fractura elástico-lineal, con respecto al tipo y tamaño de defecto crítico identificado experimentalmente.

**Abstract.** The fracture resistance of a WC-Co cemented carbide with different surface conditions is studied. The surface finish grades investigated, corresponding to distinct machining processes: grinding and polishing using diamond as abrasive, and electro-discharge machining, are characterized in terms of the roughness and surface integrity implicit to each of them. Considering that rupture is related to existing defects, either introduced during sample elaboration or induced by machining, a fractographic examination is conducted in order to discern fracture origins. Finally, mean and dispersion values for the fracture resistance evaluated for each condition are discussed and analyzed, by means of linear-elastic fracture mechanics, with respect to type and size of the critical defects experimentally identified.

**1. INTRODUCCIÓN**

La alta dureza y excelente resistencia al desgaste de carburos cementados del tipo WC-Co, convencionalmente referidos como metal duro, han vinculado estos materiales a procesos de gran responsabilidad técnica y económica en el conformado mecánico de metales, y en particular de aceros y fundiciones. Así, la utilización de carburos cementados es cada día más habitual en operaciones de mecanizado (corte con viruta), de trefilado mediante hileras o de conformación metálica a través de matrices y punzones, entre otras. Las propiedades referidas están íntimamente asociadas a las características microestructurales del metal duro: carburos de elevada dureza unidos o cementados mediante un metal o una aleación auxiliar de menor dureza, frecuentemente cobalto [1].

Por otra parte, los carburos cementados utilizados en la práctica presentan una proporción de fase ligante entre 5 y 25% en peso, lo cual implica que estos materiales exhiban valores de tenacidad relativamente bajos. Esta característica repercute en una fiabilidad menor a la deseada así como, junto a su elevada dureza, en

mayores grados de dificultad para su mecanizado.

La caracterización mecánica de metales duros es un tema ampliamente cubierto en la literatura, aunque predominantemente en términos de la influencia de características microestructurales básicas, como la fracción de ligante o el tamaño medio y distribución de los carburos, sobre la resistencia a la rotura transversal de estos materiales. Revisiones detalladas de los trabajos realizados en este campo se pueden consultar en diversos artículos, un ejemplo de los cuales es la Ref. [2]. Sin embargo, no se ha prestado una atención similar a un aspecto tan importante en la fractura de materiales frágiles como es el efecto del acabado superficial [3,4], resultante de los distintos procesos de mecanizado.

Desde el punto de vista de procesos de mecanizado, la sustitución de utillaje de acero rápido o ultra-rápido por herramientas de metal duro es limitada muchas veces por la posible mecanización de estas últimas mediante procesos de fabricación como la electroerosión, en contrapartida a operaciones convencionales de rectificado (desbaste y pulido). La aplicación de la técnica de electroerosión para el contorneado de

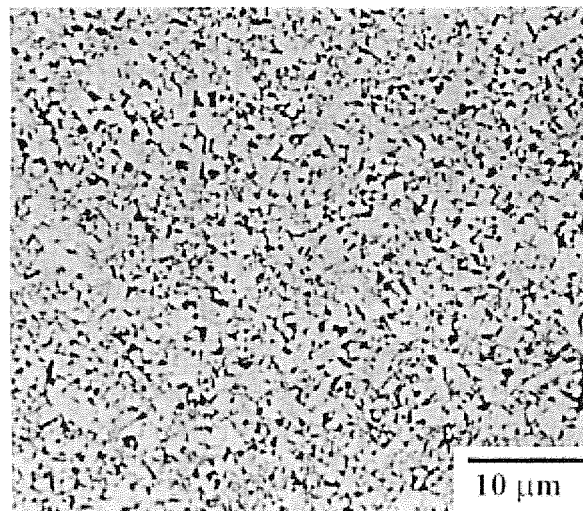
carburos cementados se traduce generalmente en la existencia de una zona afectada en la región cercana a la superficie y/o una rugosidad excesiva, lo cual puede resultar nefasto para la integridad estructural de la pieza mecanizada. Aunque se han realizado varios estudios sobre los efectos directos de diversos parámetros de corte por electroerosión sobre la integridad de la superficie resultante [5,6], no existen investigaciones similares sobre la determinación de correlaciones entre parámetros mecánicos y distintos acabados por electroerosión. Es evidente que un mejor conocimiento de esta dependencia es necesario, si se quiere optimizar la aplicación de estos materiales. En este orden de ideas, en el presente trabajo se estudia la resistencia a fractura de un carburo cementado de grano fino y 10% en peso de cobalto, bajo distintos grados de acabado superficial obtenidos a través de varias modificaciones en el proceso de mecanizado: 1) corte, desbaste y pulido convencional (con diamante como abrasivo principal), y 2) electroerosión.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material estudiado es un carburo cementado WC-Co comercial, con 10% en peso de fase ligante y tamaño de carburo medio de  $0.8 \mu\text{m}$  (Figura 1), y fue suministrado en forma de piezas de sección rectangular ( $4 \times 3 \text{ mm}$ ) y longitud de 45 mm.

Ocho grados de acabado superficial diferentes fueron analizados. Un grado correspondió al del material en estado de recepción, sinterizado y cortado mediante un disco de diamante, y se referirá como R. Dos grados se obtuvieron mediante desbaste y pulido convencional utilizando diamante: 1) simple desbaste grueso (DB), y 2) DB seguido de desbaste fino hasta pulido (P). Otras cinco condiciones resultaron de contornear una de las caras longitudinales de las probetas en una máquina de electroerosión de altas prestaciones, mediante corte por hilo bajo parámetros de operación variables (tensión, intensidad, frecuencia, espesor de corte), fijando como referencia la rugosidad y la integridad superficial de cada grado. Así, se obtuvieron cuatro niveles de acabado diferentes: basto (A), medio (B), fino (C) y microfino (D). Mientras los dos primeros grados se alcanzaron utilizando un solo paso por nivel de corte (basto y medio), el grado C requirió cinco pasos en el nivel fino y el D tres adicionales en el nivel microfino. Finalmente, debido a que en la práctica las piezas de metal duro mecanizadas por electroerosión son (en lo posible) sometidas a un chorreado y pulido posterior, con el objeto de satisfacer la calidad superficial requerida, se logró un último grado siguiendo estas operaciones (DP). Fueron estudiadas tres probetas por condición, excepto en el caso del grado R para el cual se analizaron cinco muestras.

La rugosidad superficial fue determinada mediante un palpador de punta de diamante, con una resolución de  $0.005$  y  $0.0005 \mu\text{m}$  en los rangos de medición correspondientes a los acabados superficiales logrados en las distintas operaciones arriba descritas,  $80$  y  $8 \mu\text{m}$  respectivamente. La integridad de la superficie para cada grado fue evaluada, tanto en vista frontal como transversal, mediante microscopía óptica y electrónica de barrido (MEB).



**Fig. 1.** Características microestructurales del material estudiado en este trabajo.

La resistencia a la rotura transversal de las probetas con distintos acabados superficiales se determinó en flexión por cuatro puntos (distancias de separación entre rodillos superiores e inferiores,  $20$  y  $40 \text{ mm}$  respectivamente). Previamente a los ensayos y con el objetivo de evitar que los cantos de las aristas longitudinales de las muestras actuaran como concentradores de tensión, éstas se biselaron mediante desbaste manual. Las pruebas se realizaron en una máquina servohidráulica con capacidad estática de  $20 \text{ KN}$  y a una velocidad de aplicación de la carga de  $100 \text{ N/s}$ . Finalmente, las superficies de rotura de todas las probetas ensayadas fueron examinadas por MEB.

## 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la **Tabla I** se indican los resultados obtenidos del análisis de la rugosidad de los distintos acabados superficiales. Los parámetros de rugosidad presentados corresponden a la media aritmética del valor absoluto de las distancias desde la línea media al perfil ( $R_a$ ); y a la media de los valores máximos entre pico y valle determinados en cada uno de los barridos realizados ( $R_y$ ). Como se puede observar, los valores para los acabados de electroerosión basto (A) y medio (B) son mayores incluso que los obtenidos para el material en condiciones de recepción (R). Por otra parte, los parámetros de rugosidad de los acabados fino (C) y microfino (D) son notablemente menores que para el

grado de referencia R, aunque mayores que los determinados para las condiciones logradas mediante pulido final (P y DP).

**Tabla I.** Parámetros de rugosidad para cada uno de los grados de acabado superficial evaluados.

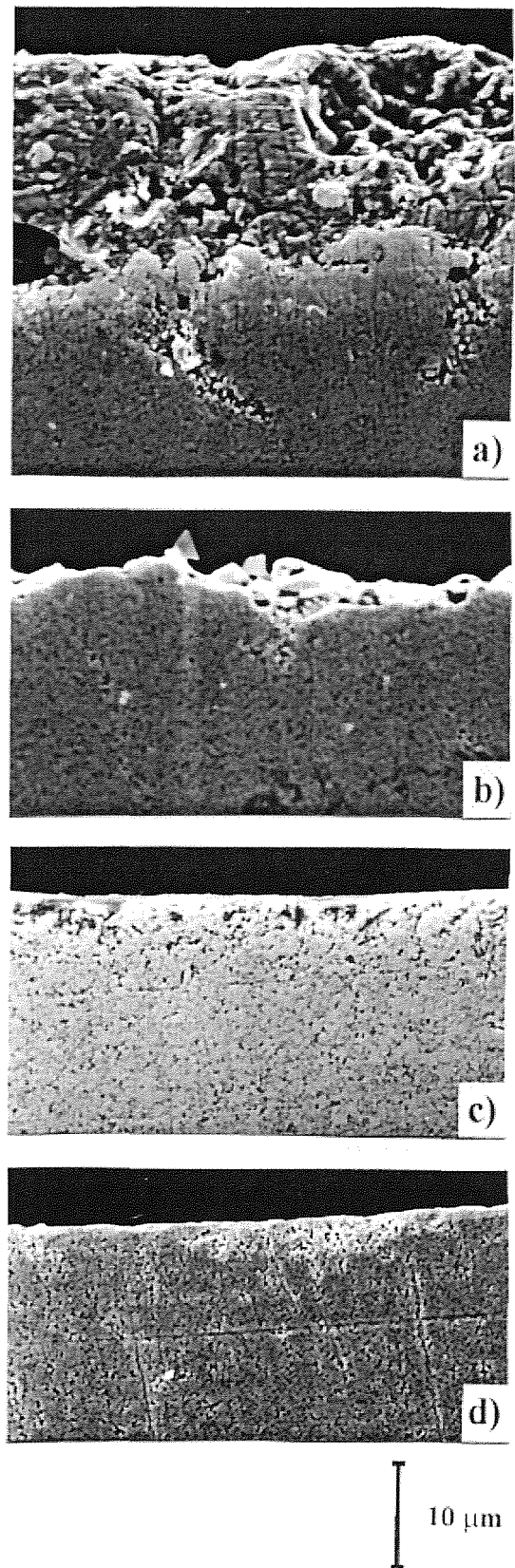
Condición	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_y$ ( $\mu\text{m}$ )
R	1.190	7.140
DB	0.108	1.023
P	0.011	0.071
A	3.745	20.170
B	1.330	8.300
C	0.406	2.837
D	0.113	0.884
DP	0.007	0.053

Los resultados cuantitativos de rugosidad son similares, al comparar entre sí los distintos acabados de electroerosión, a lo reflejado cualitativamente por el examen detallado de la integridad de las superficies correspondientes. A medida que el acabado es más fino se aprecia que el espesor de la capa de sólido depositada sobre la superficie, fase metálica previamente fundida o sublimada y posteriormente resolidificada, es menor (Figura 2). Iguales observaciones se pueden hacer en términos de cráteres en la superficie y zonas adyacentes, y de microfisuras que se extienden hacia el volumen del material.

Los valores medios de la resistencia a rotura transversal y la desviación estándar correspondiente para cada condición investigada se muestran en la **Tabla II**.

Tomando como referencia la condición R, se aprecia que los acabados relacionados con operaciones de electroerosión muestran una disminución del valor medio de sus características mecánicas. La magnitud de esta degradación disminuye a medida que el acabado superficial (rugosidad e integridad superficial) es mejor, llegando a valores de sólo entre 25 y 15% para las condiciones D y DP respectivamente. Por otra parte, es interesante destacar que los valores de la dispersión de los resultados obtenidos para los grados alcanzados mediante electroerosión son notablemente inferiores que el determinado para la condición de recepción.

Con respecto a los valores medios de resistencia mecánica determinados para los acabados superficiales logrados a partir de procesos de desbaste y pulido exclusivamente, en todos los casos estos son muy superiores, como era de esperar, al evaluado para el



**Fig. 2.** Vista transversal de las superficies correspondientes a los distintos acabados obtenidos mediante electroerosión: a) A; b) B; c) C; y d) D.

estado de referencia. Aunque las operaciones de desbaste fino y pulido (P) no parecen afectar apreciablemente el valor medio de la resistencia a rotura determinada para las muestras rectificadas mediante simple desbaste (DB), la dispersión de los resultados en el primer caso decrece significativamente, en relación al segundo, alcanzando valores similares a los obtenidos para las piezas cuyo mecanizado involucró alguna operación de electroerosión.

**Tabla II.** Resistencia a fractura para cada una de las condiciones de acabado superficial investigadas.

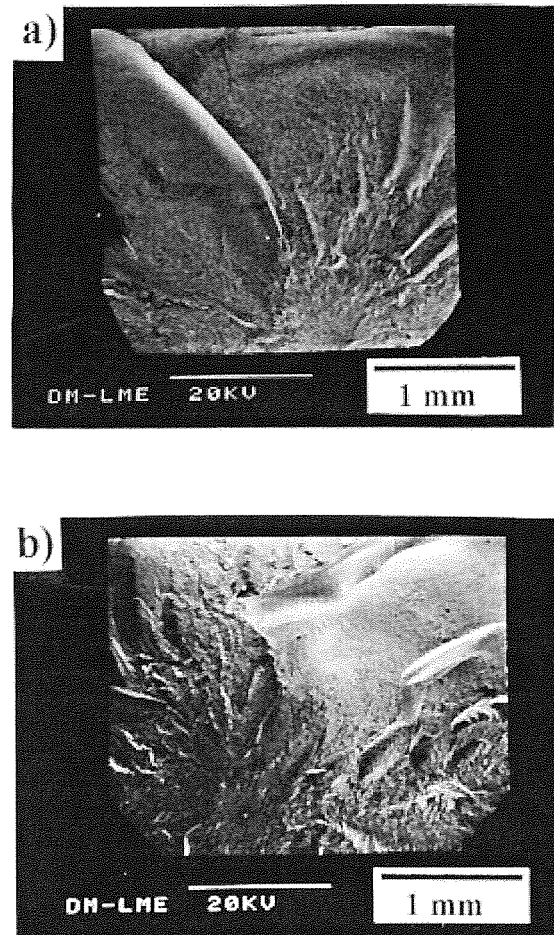
Condición	Resistencia a rotura (MPa)	
	Valor medio	Desviación estándar
R	1860	407
DB	2639	204
P	2742	32
A	1042	49
B	1146	73
C	1256	64
D	1320	15
DP	1575	33

El análisis fractográfico de las superficies de rotura de todas las probetas ensayadas permitió apreciar que: 1) la fractura de todas las muestras correspondientes a las condiciones A, B, C, D y DP tiene su origen en defectos superficiales generados durante las operaciones de electroerosión previas (**Figura 3a**); 2) las muestras de grado P exhiben una rotura asociada con defectos ubicados en el volumen del material, aunque siempre muy cercanos a la superficie, como era de esperarse al considerar las solicitaciones de flexión utilizadas; 3) en las probetas con acabado tipo R la rotura parece tener varios lugares de origen, a veces difíciles de discernir, la mayoría de los cuales están ligados a discontinuidades en el perfil superficial de las mismas; y 4) las muestras de grado DB presentan un comportamiento mixto de rotura; es decir, el lugar de origen algunas veces es un defecto interno (**Figura 3b**) y otras parece estar relacionado con la rugosidad superficial o con cierta heterogeneidad, como algún carburo de gran tamaño, justo en la capa superficial.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Un gran número de investigaciones sobre la rotura de materiales frágiles permiten concluir que el fallo de

éstos está asociado a la propagación de fisuras existentes en el material (por ejemplo, Ref. [7]). Frecuentemente el origen de estas fisuras es un defecto, bien ya existente como resultado del proceso de elabo-



**Fig. 3.** Superficies de rotura para probetas de las condiciones: a) C; y b) DB.

ración del material, bien inducido durante las operaciones de mecanizado de la pieza o bajo condiciones de servicio. Así, es de esperar que el nivel de resistencia del material venga dado en función de la tenacidad de fractura del mismo y el tamaño de defecto crítico existente para unas condiciones dadas, según:

$$K_c = Y \sigma \sqrt{\pi a_c}$$

donde  $K_c$  es la tenacidad de fractura del material,  $a_c$  es la longitud de la fisura crítica,  $\sigma$  es la tensión de rotura e  $Y$  es un factor adimensional que depende de la geometría y de la forma de la solicitación.

Resultados preliminares correspondientes a la determinación de la tenacidad de fractura de carburos cementados, obtenidos como parte de una investigación paralela y en progreso a la aquí presentada, permiten

estimar un valor de  $7.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  para el  $K_c$  del material estudiado. Dicho valor se sitúa en el rango de tenacidad de fractura indicado por otros investigadores para metales duros con características similares al investigado en este trabajo; es decir,  $6-10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  [8,9]. Así, asumiendo un factor adimensional  $Y$  de 0.73, correspondiente a una fisura pequeña semicircular y superficial [10], se han estimado los valores medios de  $a_c$  correspondientes a cada una de las condiciones investigadas y se indican en la **Tabla III**. El rango de tamaños de los defectos identificados mediante MEB como posible origen de la rotura, cuando esto ha sido posible, también se incluye en dicha tabla con fines comparativos.

El valor de tamaño de defecto crítico para el grado P es del orden de magnitud del tamaño de los defectos internos ( $d_i$ ), identificados como causa de rotura en estos materiales mediante examen fractográfico. Estos defectos consisten, por lo general, en grupos de carburos que parecen haber quedado sueltos durante la sinterización del material (posiblemente por insuficiente mojado o por un difícil acceso a ellos de la fase ligante). Esta observación, junto con el hecho que la máxima diferencia pico-vals en el perfil de rugosidad correspondiente sea dos órdenes de magnitud menor que el tamaño de estos defectos, explican por sí mismas que en esta condición el proceso de elaboración sea quien controla la rotura del material. De esta manera, se puede afirmar que las características mecánicas evaluadas para la condición P son las intrínsecas del material estudiado, en concordancia con lo citado por Fernandes y col. en un estudio previo [4]. Un análisis similar se puede realizar para la condición DB, pero destacando que en este caso los valores medios de  $d_i$  y  $R_y$  son del mismo orden de magnitud, lo cual es la razón del comportamiento mixto observado con respecto al origen de la rotura de las diversas probetas y la alta dispersión de los resultados obtenidos.

En relación con los acabados alcanzados mediante electroerosión, los valores de tamaño de defecto crítico estimados siguen la tendencia de los determinados experimentalmente, y con ello sustentan la existencia de una clara correlación de la resistencia mecánica del material con la integridad superficial resultante de la electroerosión, y no con la rugosidad evaluada. Las posibles razones de este hecho son que durante la electroerosión se generan cráteres y microgrietas (ver **Fig. 2**), los cuales son en realidad los defectos responsables de la rotura del material para estas condiciones, y que bien porque son encubiertos por la capa resolidificada sobre la superficie (cráteres) o por su agudez (microfisuras) son imposibles de evaluar mediante un palpador superficial. Más aún, la relación descrita entre resistencia a rotura e integridad superficial permite constatar indirectamente, gracias a la mínima dispersión obtenida de los resultados

experimentales, una excelente consistencia y homogeneidad de los cortes realizados por electroerosión.

**Tabla III.** Tamaño de defecto crítico, estimado y determinado experimentalmente (rango) mediante MEB, para las condiciones estudiadas.

Condición	$a_c$ ( $\mu\text{m}$ ) estimado	$a_c$ ( $\mu\text{m}$ ) experimental
<b>R</b>	10	4-12
<b>DB</b>	5	4-10
<b>P</b>	4	4-8
<b>A</b>	31	12-18
<b>B</b>	26	8-12
<b>C</b>	21	6-10
<b>D</b>	19	4-8
<b>DP</b>	14	2-6

Por otra parte, para las condiciones alcanzadas mediante electroerosión, si bien los valores de defecto crítico estimados y los observados en las superficies de fractura son del mismo orden de magnitud, los primeros son siempre mayores que los segundos. Aunque esta particular discrepancia en estos grados pudiera ser explicada en términos de posibles errores en la evaluación experimental del tamaño de defecto crítico o en la estimación de la tenacidad de fractura o del factor  $Y$ , el hecho que: 1) las diferencias relativas para este grupo de materiales sean mayores a medida que el acabado es más fino, y 2) las diferencias para los grados que no involucran electroerosión son mínimas, sugiere que deben existir otros factores más importantes y que se deberían considerar, para una mejor comprensión del efecto del acabado superficial en la rotura de carburos cementados. Uno de ellos es la incertidumbre existente sobre la magnitud de la zona afectada por la electroerosión y su efecto sobre la distribución y tipo de defectos existentes en el material. Otro es la posible propagación subcrítica relacionada con un aumento de la resistencia del material a la propagación de fisuras al incrementar ésta su longitud. Dicho comportamiento de curva-R sería posible en metales duros como consecuencia de la bien conocida formación de una zona de multiligamentos de la fase metálica en la estela de la fisura en estos materiales [11]. Aunque se sabe que en carburos cementados convencionales esta región tiene una longitud de cinco veces, aproximadamente, el tamaño de carburo medio [12], las fisuras agudas que se originan como consecuencia de las variaciones de temperatura implícitas a la electroerosión son relativamente pequeñas, en particular para los acabados

más finos, y podrían no tener esta zona completamente desarrollada. Por otra parte, la pequeñez de estos defectos críticos, en conjunto con el posible desarrollo de su curva R a lo largo de sólo unos pocos carburos podría implicar la observación de tensiones de rotura menores a las esperadas a partir de un valor de  $K_{Ic}$  igual al de saturación (plateau). Una u otra de estas consideraciones resultarían en un tamaño real de defecto crítico mayor al determinado experimentalmente o en un tamaño de defecto estimado menor al indicado en la **Tabla III**.

Finalmente, cabe hacer referencia a los resultados obtenidos para la condición R, donde la altísima dispersión evaluada en los ensayos mecánicos está en concordancia con una rotura controlada por las discontinuidades geométricas asociadas al perfil de rugosidad, bastante heterogéneo, inducidas con el corte mediante disco de diamante utilizado para manufacturar las probetas según la geometría de ensayo.

### 5. CONSIDERACIONES FINALES

La resistencia a rotura de carburos cementados está íntimamente relacionada al tamaño y naturaleza de los defectos existentes en el material. Éstos pueden ser introducidos en el mismo durante su elaboración o bien en el proceso de mecanizado posterior, y dependiendo de su tamaño, ubicación (superficie/volumen) y distribución, los de un tipo o los del otro controlarán las características mecánicas del metal duro.

Desde el punto de vista de la utilización de materiales frágiles en aplicaciones estructurales, tanto el valor medio (funcionalidad) como la dispersión correspondiente de la propiedad (fiabilidad) son de extrema importancia. En este orden de ideas, considerando las propiedades exhibidas por el grado de referencia R, la tendencia indicada por los resultados aquí obtenidos permite afirmar que todas las operaciones de mecanizado estudiadas en esta investigación que se puedan considerar como paso final (grados C, D, DP, DB o P) repercuten globalmente en una mejora del rendimiento de los carburos cementados en términos mecánicos. La metodología a utilizar vendrá dictada por cuestiones específicas de la pieza requerida, en particular la geometría, el nivel de sollicitación y la fiabilidad exigidos, factores que finalmente dictaminarán la viabilidad de seguir una u otra metodología.

### 6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) en el marco del proyecto MAT97-0923. Los autores aprecian la colaboración de los entes industriales Durit, Charmilles Technologies, AMP y

Plusdur, sin las cuales esta investigación no se hubiera podido realizar.

### 7. REFERENCIAS

- [1] Bas, J.A., "Pulvimetalurgia del metal duro: aplicaciones en matricería", Avances en la Deformación Metálica, 115-130 (1996).
- [2] Roebuck, B. y Almond, E.A., "Deformation and fracture processes and the physical metallurgy of WC-Co hardmetals", Int. Mater. Rev. 33, 90-110 (1988).
- [3] Stephenson, D., Chung, T.E. y Coleman, D.S., "The effect of surface conditions on the fatigue strength of cemented tungsten carbides containing 6 and 25% cobalt", Proc. 11th. Int. Plansee Seminar, Vol. 2, 619-642 (1985).
- [4] Fernandes, J.J., Pacheco Da Silva, C., Guerra Rosa, L. y Saraiva Martins, C., "Effects of surface roughness on the flexural strength of a hardmetal", J. Mater. Sci. 29, 2008-2012 (1994).
- [5] Gadala, A.M. y Tsai, W., "Machining of WC-Co composites", Mater. Manuf. Processes 4, 411-423 (1989); "Electrical discharge machining of tungsten carbide-cobalt composites", J. Am. Ceram. Soc. 72, 1396-1401 (1989).
- [6] Maggi, F., "Le decoupage par étincelage des carbures métalliques", Informe técnico AGIE SA 010.188.1 RZ (1991).
- [7] Lawn, B., "Fracture of brittle solids", 2ª Edición, Cambridge University Press (1993).
- [8] Pickens, J.R. y Gurland, J., "The fracture toughness of WC-Co alloys measured on single-edge notched beam specimens precracked by electron discharge machining", Mater. Sci. Eng. 33, 135-142 (1978).
- [9] Ravichadran, K.S., "Fracture toughness of two phase WC-Co cermets", Acta metall. mater. 42, 143-150 (1994).
- [10] Newman Jr., J.C. y Raju, I.S., "An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack", Eng. Fract. Mech. 15, 185-192 (1981).
- [11] Sigl, L.S., Exner, H.E. y Fischmeister, H.F., "Characterization of fracture processes and fracture relevant parameters in WC-Co hardmetals", Science of Hard Materials, 631-644 (1986).
- [12] Sigl, L.S. y Exner, H.E., "Experimental study of the mechanics of fracture in WC-Co alloys", Metall. Trans. A 18A, 1299-1308 (1987).