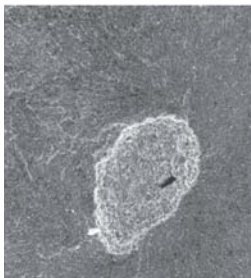


# Comportamiento a fractura de carburos cementados WC-Co ultrafinos

David Coureaux Mustelier<sup>A</sup>, Alexey Goéz Úsuga<sup>A</sup>,  
Blanca Reig López<sup>B</sup>, Luis Miguel Llanes Pitarch<sup>A</sup>

<sup>A</sup>Dept. de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona  
dacm50@yahoo.es

<sup>B</sup>Sandvik Hard Materials – Sandvik Española S.A.



## RESUMEN

*En este trabajo se estudia el comportamiento a rotura de diferentes calidades de carburos cementados WC-Co ultrafinos. Se efectuó una caracterización microestructural y mecánica de dichos materiales, incluyendo un análisis de la fiabilidad de los mismos aplicando la estadística de Weibull a los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la flexión. Estos resultados se han evaluado mediante un enfoque basado en la mecánica de la fractura elástica lineal para establecer la relación entre el rendimiento de componentes fabricados de metal duro y la presencia de defectos críticos, así como con las propiedades intrínsecas de estos materiales. Para ello, el estudio incluye la determinación de la tenacidad a la fractura de las distintas calidades, implementando técnicas de indentación.*

## PALABRAS CLAVES

Carburos cementados, Resistencia a rotura, Tenacidad a la fractura, Mecánica de la Fractura, Calidades ultrafinas.

## ABSTRACT

*In this work, the fracture behaviour of different ultrafine hardmetal grades was studied. Microstructural and mechanical characterization of these materials was performed, including a reliability assessment through Weibull statistics analysis of the results obtained in the flexural strength tests. These results have been evaluated on the basis of a linear elastic fracture mechanics approach for establishing the relationship between the performance of parts made of hardmetals and the presence of defects, as well as with the intrinsic properties of these materials. This study includes the fracture toughness evaluation for the different hardmetal grades, by means of indentation techniques.*

## KEYWORDS

Cemented Carbides, Fracture strength, Fracture toughness, Fracture mechanics, Ultrafine grades.

## INTRODUCCIÓN

Los carburos cementados WC-Co, también conocidos como metal duro, presentan una microestructura compuesta por partículas cerámicas, WC, aglomeradas por un ligante metálico (generalmente una solución sólida rica en Co).

Esta particular microestructura le confiere una combinación de excelentes propiedades que les permite abarcar un amplio abanico de aplicaciones.<sup>1-2</sup> Una de las propiedades mecánicas por la cual el metal duro es más empleado frecuentemente es su resistencia a la rotura transversal, siendo siempre la relación entre esta y la microestructura una cuestión atractiva que ha llamado la atención de muchos investigadores. Trabajos anteriores han dictaminado que el rendimiento de piezas y componentes fabricados de metal duro, está relacionado con los aspectos microestructurales.<sup>3-5</sup> Otros reconocen que dicho rendimiento está condicionado además a la presencia de defectos pre-existentes en el material debido al procesamiento.<sup>6-7</sup> Lo cual justifica el empleo de la resistencia mecánica como un indicador de calidad en la fabricación de carburos cementados.

La tendencia a la miniaturización de herramientas a emplear en algunas aplicaciones, junto a la creciente demanda de materiales con una mayor dureza acompañada de un buen comportamiento mecánico, ha conllevado al desarrollo de calidades de metal duro de tamaños de grano cada vez más finos. Novedosas técnicas pulvimetalúrgicas se han desarrollado con la finalidad de obtener calidades submicrométricas, ultrafinas y nanométricas, en las cuales es imprescindible el uso de inhibidores del crecimiento del grano, así como una mejor clasificación y purificación de las materias primas; con el propósito de disminuir los defectos intrínsecos tanto en número como en tamaño.<sup>8</sup> Sin embargo, para tamaños de granos muy pequeños resulta difícil controlar o evitar la presencia de estos defectos,<sup>1</sup> lo cual conlleva a una influencia directa en la resistencia mecánica. El empleo de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL) en el análisis del comportamiento a fractura de carburos cementados ha sido una acertada herramienta en la descripción del mecanismo de fractura de estos materiales frágiles (gobernada por la propagación inestable de los defectos pre-existentes en el material).<sup>9</sup> En este contexto, está bien establecido que la relación entre los defectos pre-existentes en el material y la resistencia a la fractura de éste, a través de la tenacidad a la fractura ( $K_{Ic}$ ), ecuación (1), donde Y es coeficiente adimensional que depende de la geometría de la probeta y el defecto así como la configuración del ensayo,  $a_c$  es la mitad tamaño del defecto crítico y  $\sigma_{rot}$  resistencia a la rotura:

$$K_{Ic} = Y \sigma_{rot} \sqrt{\pi a_c} \quad (1)$$

La tenacidad de la fractura y la dureza son propiedades intrínsecas del material que resultan importantes parámetros para el diseño de herramientas y componentes. En ambas propiedades la microestructura del material juega un papel determinante. En numerosos trabajos reportan que son varios los parámetros microestructurales que influyen en las propiedades mecánicas del material; sin embargo, existe controversia en definir algún parámetro único para establecer estas relaciones. La mayoría de los autores concuerdan que los parámetros normalizadores que permiten una idea más clara de dicha influencia son la contigüidad de los carburos ( $C_{WC}$ ) y el camino libre medio de cobalto ( $\lambda_{Co}$ ).<sup>3</sup> El objetivo de este trabajo consiste en evaluar la influencia de los parámetros microestructurales en la dureza, tenacidad de fractura y la resistencia mecánica de carburos cementados ultrafinos; los resultados obtenidos son entonces analizados para establecer una correlación entre la resistencia mecánica y las mencionadas propiedades, en un intento por definir estrategias de optimización microestructural que permitan mejorar el rendimiento mecánico de herramientas y piezas fabricadas de estos materiales.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se evaluaron tres calidades de carburos cementados con distintos parámetros microestructurales, en cuanto a contenido de cobalto y tamaño de carburo medio. La nomenclatura utilizada a lo largo del trabajo para definir las calidades (L21, L12, L22), describiéndose el procedimiento experimental en los siguientes apartados.

### Preparación de muestras y caracterización microestructural.

Para la caracterización microestructural y mecánica del material las muestras fueron previamente desbastadas y finalmente pulidas según el protocolo detallado por Sailer y col.<sup>4</sup> El tamaño de grano se determinó mediante micrografías de las calidades a estudiar mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) figura 1. Estas micrografías se trataron posteriormente empleando un software de análisis de imágenes. En tanto el análisis de la composición

química del material llevado a cabo mediante la técnica de espectroscopía de difracción de rayos X (EDX), permitió determinar el contenido de cobalto presente en el material.

Para determinar los parámetros microestructurales  $C_{WC}$  y  $(\lambda_{Co})$ , se han empleado las expresiones propuestas en el trabajo de Roebuck y Almond,<sup>3</sup> que se ajustan para un contenido de Co entre 5-35% en volumen. Así la contigüidad se estimaría a partir de la ecuación (2):

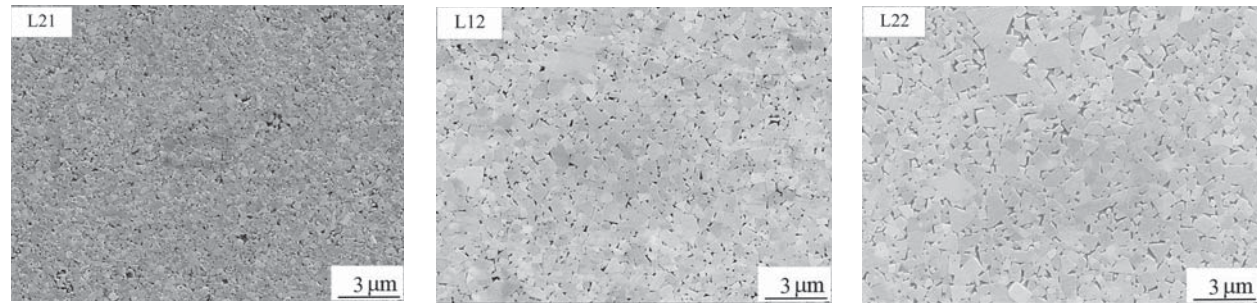


Fig. 1. Microestructuras obtenidas por MEB de las calidades estudiadas: a) Calidad L21, b) Calidad L12, c) Calidad L22.

$$C_{WC} (V_{Co})^n = D \quad (2)$$

siendo  $n$  y  $D$  constantes con valores de 0.45 y 0.2 respectivamente. Por su parte, los mismos autores plantean que para estructuras en las cuales una fase predomina sobre otras, tal que un valor de contigüidad puede ser definido, el camino libre medio viene dado por la ecuación (3):

$$\lambda_{Co} = d_{Co} = \frac{1}{1 - C_{WC}} \frac{V_{Co}}{V_{WC}} d_{WC} \quad (3)$$

### Caracterización mecánica

La caracterización mecánica llevada a cabo incluye la evaluación de la dureza, la tenacidad a la fractura y la resistencia mecánica. La dureza (HV30) y tenacidad a la fractura ( $K_{Ic}$ ) se determinaron a partir de 10 indentaciones Vickers realizadas con un durómetro tipo FRANK 532 aplicando una carga de 294 N, en tanto la tenacidad a la fractura se determinó según la ecuación propuesta por Shetty y col.,<sup>10</sup> donde  $H$  es la dureza del material y  $W$  es la resistencia a la grieta.

$$K_{Ic} = 0.0889 (H \cdot W)^{1/2} \quad (4)$$

La resistencia mecánica se evaluó en términos de la resistencia a la rotura transversal,  $(\sigma_{rot})$ . Se ensayaron probetas prismáticas con dimensiones de 45x4x3 mm previamente pulidas en la zona sometida a tracción, redondeándose las aristas para

evitar la presencia de posibles concentradores de tensión. Para cada calidad estudiada se ensayaron 10 muestras a flexión en cuatro puntos, con separaciones entre puntos de apoyo externos e internos de 40 y 20 mm respectivamente, y con una velocidad de aplicación de la carga de 100 N/s. Los ensayos se realizaron empleando una máquina servohidráulica INSTRON 8511. Finalmente, las superficies de fractura se analizaron a través de un minucioso examen mediante MEB.

Para estimar la fiabilidad mecánica de dichos materiales en cuanto a la resistencia a la rotura transversal, se aplicó la estadística de Weibull. Para ello, se empleó la siguiente función de probabilidad:

$$P_f = \frac{n-0,5}{N} \quad (4)$$

Donde  $n$  es el número de probetas que rompen por debajo de un esfuerzo determinado y  $N$  es el número total de probetas empleadas en cada calidad. Se supuso que los valores de fractura siguen la estadística de Weibull de acuerdo a la expresión (5):

$$P = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_{rot}}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (5)$$

Donde  $P$  es el esfuerzo de rotura que experimenta la probeta y los parámetros  $m$  y  $\sigma_0$  son constantes que gobiernan la distribución, donde  $m$  se relaciona con la fiabilidad de los materiales, siendo mayor a medida que la distribución de los esfuerzos de rotura es más estrecha.<sup>11</sup>

## DISCUSIÓN

### Dureza y tenacidad a la fractura

Los resultados de la caracterización microestructural y mecánica de las calidades estudiadas se muestran en las tablas I y II.

Tabla I. Parámetros microestructurales de las calidades de WC-Co estudiadas.

Calidad	L21	L12	L22
V <sub>Co</sub> (%)	11.4	5,8	13.3
d <sub>WC</sub> (μm)	0.17	0,37	0.40
λ <sub>Co</sub> (μm)	0.05	0,08	0.12
C <sub>WC</sub>	0.53	0,72	0.49

Tabla II. Propiedades mecánicas de las calidades de WC-Co estudiadas en este trabajo.

Calidad	L21	L12	L22
HV30 (GPa)	20,5±0.6	18,8±0.8	16.9±0,2
K <sub>IC</sub> (MPa·m <sup>1/2</sup> )	8,3±0.1	8,7±0.1	9.9±0,1
σ <sub>rot</sub> (MPa)	1757±318	2214±473	3287±313
Módulo de Weibull	7	8	8
Módulo de Elasticidad GPa	632	667	633

Donde se aprecia la dependencia del comportamiento mecánico con respecto a los parámetros microestructurales. La dureza y tenacidad a la fractura obtenidas se ajustan acorde a lo indicado en la literatura, donde la dureza disminuye al aumentar el tamaño promedio de carburo y/o el contenido de ligante, observándose un comportamiento inverso para la tenacidad a la fractura. Sin embargo, al variar ambos parámetros es imposible establecer una relación simple. Este inconveniente se elimina al utilizar el camino libre medio de cobalto (λ<sub>Co</sub>) como parámetro normalizador de la microestructura, en el cual se contabiliza la influencia tanto del tamaño medio de grano de los carburos como del contenido de cobalto (un aumento de tamaño de grano WC y/o contenido de ligante conlleva a un aumento de λ<sub>Co</sub>), figura 2. De manera general, se observa que la dureza disminuye y la tenacidad aumenta a medida que aumenta el λ<sub>Co</sub>.

**Resistencia mecánica: Su relación con las propiedades intrínsecas y defectos pre-existentes en el material**

La resistencia mecánica en las calidades estudiadas mostró un incremento al aumentar el λ<sub>Co</sub>, lo cual es acorde con comportamientos referidos en trabajos anteriores<sup>3,4</sup> (figura 3a). Atendiendo a esto se puede inferir una relación entre la resistencia mecánica y las propiedades intrínsecas del material donde para un aumento de la dureza del material asociada con

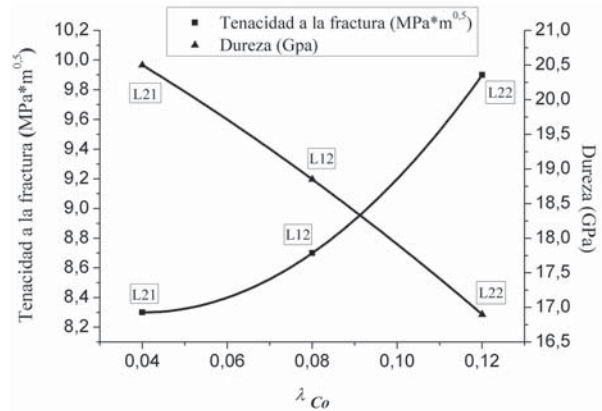


Fig. 2. Tenacidad de la fractura y dureza con respecto al camino libre medio de cobalto.

la disminución del λ<sub>Co</sub>, los resultados obtenidos muestran una caída de la resistencia y de la tenacidad a la fractura, (figura 3b). Por su parte a medida que aumenta la tenacidad de fractura en el material existe un incremento en la resistencia mecánica. De forma concluyente se puede destacar que para estas calidades ultrafinas, un aumento del tamaño de grano y/o del contenido de ligante resulta una mejora en la resistencia a la rotura.

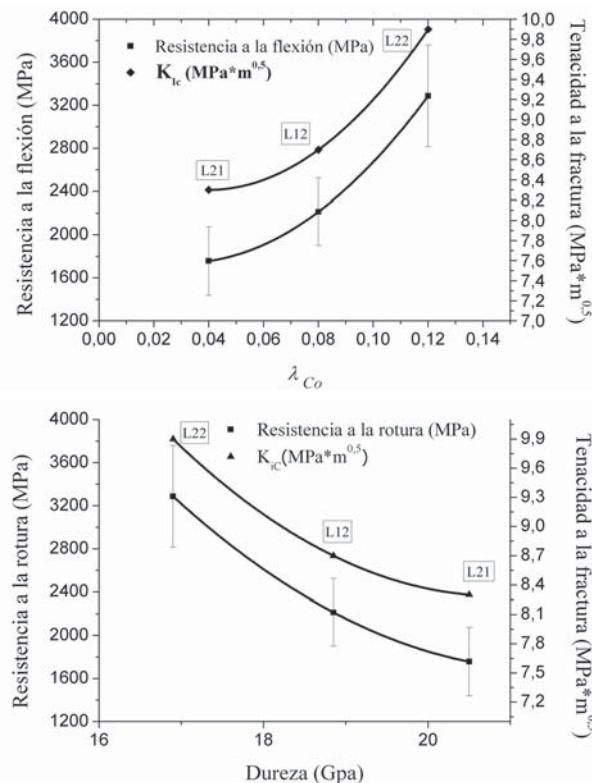


Fig. 3. Resistencia mecánica y tenacidad a la fractura con respecto: a) camino libre medio de ligante, b) dureza del material.

Se realizó un análisis fractográfico mediante MEB de las zonas de fractura resultantes de los ensayos de flexión, con la finalidad de observar el origen de la fractura en el material, encontrándose como inicios de fractura defectos intrínsecos al procesamiento: heterogeneidades microestructurales (inclusiones, poros y carburos grandes), mostrados en la figura 4. Posteriormente se realiza una comparación directa entre los tamaños de los defectos críticos medidos experimentalmente y los estimados a partir de un análisis en el contexto de la MFEL (ecuación 1), a partir de los resultados experimentales obtenidos de resistencia a rotura transversal y la tenacidad a la fractura (tabla III). Con el propósito de estimar los tamaños de los defectos que determinan la rotura, se utiliza el factor  $Y$  que corresponde a la solución de un defecto circular embebido en la muestra, es decir  $2/\pi$ .

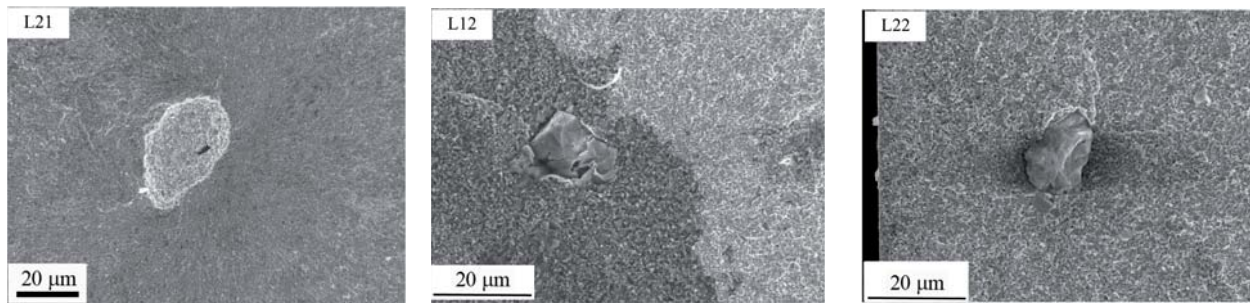


Fig. 4. Defectos críticos a partir de los cuales se origina la fractura del material: a) Calidad L21, b) Calidad L12, c) Calidad L22.

Tabla III Tamaño de defecto crítico (experimental y estimado con un modelo de MFEL).

Calidad	L21	L12	L22
Zac estimado ( $\mu\text{m}$ )	36	24	14
Zac experimental ( $\mu\text{m}$ )	19-37	14-34	6-33

Mediante esta comparación se puede constatar el buen ajuste del enfoque de la MFEL con los resultados experimentales, así como la relación entre la tenacidad a la fractura y la resistencia a la rotura. Todas las calidades estudiadas presentan valores similares del tamaño de los defectos críticos experimentales, debido a lo cual un aumento de la tenacidad de fractura en el material se refleja en una mayor resistencia mecánica del mismo, como muestran los resultados alcanzados, Ello permite racionalizar el comportamiento mostrado en la figura 3a) con respecto a la variación del camino libre medio de cobalto.

Los resultados indican que la relación entre el defecto crítico y el tamaño de carburo medio, es mucho mayor en las calidades estudiadas a medida que disminuye el tamaño de grano. Este hecho ratifica que a pesar de las mejoras tecnológicas en el procesamiento de los carburos cementados, resulta difícil controlar la presencia de los defectos pre-existentes en el material a medida que disminuye el tamaño de grano.

Atendiendo al interés comercial sobre estas nuevas calidades, se llevó a cabo un análisis estadístico de Weibull para los ensayos de flexión, cuya distribución se muestra en la figura 5. Como era de esperarse para materiales con un comportamiento frágil característico, se percibió un comportamiento disperso de la resistencia mecánica, arrojando como resultado valores bajos del módulo de Weibull ( $m$  entre 7 y 8) (tabla II). La distribución de tensiones

mostrada en la figura 5 y la inspección fractográfica efectuada a la superficie de fractura, sugieren un comportamiento bimodal en cuanto a  $\sigma_{rot}$ , y esto se debe a la naturaleza y tamaño de los defectos.

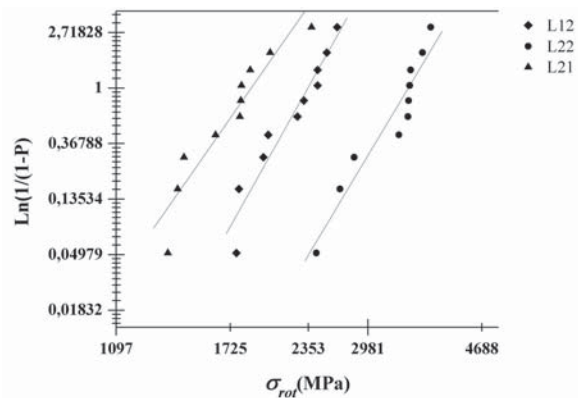


Fig. 5. Distribución de Weibull de la resistencia a rotura en las calidades estudiadas.

Dicha tendencia acompañada de la variación en la ubicación de los defectos dentro de las muestras, serán responsables de la dispersión de los valores obtenidos de los ensayos y de la fiabilidad mecánica de estas calidades. Atendiendo a lo anteriormente dicho, los menores valores de  $\sigma_{rot}$  estarán asociados a un mayor tamaño de los defectos o a una mayor cercanía de los mismos a la superficie sometida a los mayores esfuerzos de tracción en los ensayos realizados.

## CONCLUSIONES

Atendiendo a los resultados obtenidos en este trabajo se puede arribar a las conclusiones generales que se resumen a continuación:

- 1) El comportamiento mecánico varió atendiendo a la microestructura de las calidades estudiadas. Tal influencia se racionalizó empleando el camino libre medio de cobalto ( $\lambda_{Co}$ ); permitiendo relacionar a la vez el comportamiento a la fractura con la tenacidad a la fractura y la dureza del material. El aumento del camino libre de cobalto conllevó un incremento en la tenacidad de fractura y la resistencia mecánica, así como a una menor dureza del material.
- 2) La resistencia a la rotura transversal está asociada a los defectos pre-existentes en el material. Encontrándose una buena correspondencia entre los valores de tamaños de defectos estimados y los experimentales. Este hecho indica que el comportamiento a la fractura está racionalizado satisfactoriamente mediante un análisis en el marco de la MFEL.
- 3) La fiabilidad mecánica de estos materiales podría mejorarse al intentar disminuir las heterogeneidades microestructurales encontradas en los mismos, las cuales se consideran las responsables de la fractura.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de las tareas desarrolladas por SANDVIK y UPC en el proyecto Forma0, financiado por el CDTI dentro del programa CENIT. Los autores reconocen la labor y el apoyo de todos los miembros del grupo Forma0, liderado por SEAT. Adicionalmente D. Coureaux agradece a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo por la concesión de una beca MAEC-AECID.

## REFERENCIAS

1. Upadhyaya, G. S., *Cemented tungsten carbides: production, properties and testing*, Noyes Publications, New Jersey, USA, (1988), pp. 254-261.
2. Davis, J. R., *Cemented carbides*, Tool Materials, ASM Specialty Handbook, ASM International, Materials Park, USA, (1998), pp. 36-58.
3. Roebuck, B. y Almond, E. A., *Deformation and fracture processes and the physical metallurgy of WC-Co hardmetals*, Int. Mat. Rev., (1988), 33, 90-110.
4. Sailer T., Herr M., Sockel H. G., Schulte R., Feld H. y Prakash, L. J., *Microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained hardmetals*, Int. J. Refract. Met. Hard Mater., (2001), 19, 553-559.
5. Fang Z., *Correlation of Transverse Rupture Strength of WC-Co with Hardness*. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. (2005), 23, 119-127.
6. Liu B, Y. Zhang, S. Ouyang; *Study on the relation between structural parameters and fracture strength of WC-Co cemented carbides*. Materials Chemistry and Physics, (2000), 62, 35-43.
7. Y. Torres, *Comportamiento a fractura y fatiga de carburos cementados WC-Co*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (2002).
8. Gille, G., Szesny, B., Dreyer, K., van den Berg, H., Schmidt, J., Gestrich, T. y Leitner, G., *Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts*, Int. J. Refract. Met. Hard Mater., (2002), 20, 3-22.
9. Torres, Y., Casellas, D., Anglada, M. y Llanes, L., *Fracture toughness evaluation of hardmetals: influence of testing procedure*, Int. J. Refract. Met. Hard Mater., (2001), 19, 27-34.
10. Shetty, D. K., Wright, I. G., Mincer, P. N. y Clauer, A. H., *Indentation fracture of WC-Co cermets*, J. Mater. Sci., (1985), 20, 1873-1882.
11. S. Lingyan, Wu. Dongfang, Li. Yongdan; *Optimal probability estimator for determining Weibull parameters*. Journal of Materials Science Letters, (2003), 22, 1651 – 1653.