

Análisis de la influencia de las condiciones de proceso sobre el acabado superficial de materiales cerámicos fabricados por electroerosión^(*)

I. Puertas-Arbizu* y C.J. Luis-Pérez*

Resumen

El mecanizado por electroerosión (en Inglés, Electrical Discharge Machining, EDM) constituye una alternativa emergente frente a otros procesos de fabricación de materiales cerámicos conductores, tales como: mecanizado por láser, mecanizado electroquímico, chorro de agua con abrasivos, mecanizado por ultrasonidos y rectificado con muela de diamante. Debido a su interés en el ámbito industrial, en este trabajo se lleva a cabo un estudio de la influencia de las condiciones de operación sobre el aspecto superficial de tres materiales cerámicos conductores: carburo de boro prensado en caliente (B_4C), carburo de silicio infiltrado con silicio ($SiSiC$) y carburo de wolframio en matriz metálica de cobalto ($WC-Co$), electroerosionados bajo diferentes condiciones de mecanizado y para el caso particular de regímenes de acabado ($Ra \leq 1 \mu m$).

Palabras clave

EDM. Procesos de fabricación. Rugosidad superficial.

Analysis of the influence of process conditions on the surface finish of ceramic materials manufactured by EDM

Abstract

Electrical discharge machining (EDM) is an emerging alternative versus some other manufacturing processes of conductive ceramic materials, such as: laser machining, electrochemical machining, abrasive water jet, ultrasonic machining and diamond wheel grinding. Due to its interest in the industrial field, in this work a study of the influence of process conditions on the surface aspect of three conductive ceramic materials: hot-pressed boron carbide (B_4C), reaction-bonded silicon carbide ($SiSiC$) and cobalt-bonded tungsten carbide ($WC-Co$) is carried out. These materials are to be electrical discharge machined under different machining conditions and in the particular case of finish stages ($Ra \leq 1 \mu m$).

Keywords

EDM. Manufacturing processes. Surface roughness.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia y el interés del estudio de la electroerosión por penetración (EDM) para el mecanizado de materiales cerámicos conductores es consecuencia de la dificultad de procesado de estos materiales mediante otros procesos de fabricación tales como el mecanizado por láser, el mecanizado por chorro de abrasivos, el mecanizado por ultrasonidos o el proceso de rectificado con muela de diamante, entre otros. Por ello, la EDM constituye un campo emergente en el procesado de materiales cerámicos^[1-9]. La aplicación de la electroerosión al mecanizado de materiales cerámicos conductores presenta, entre otras^[10], las ventajas de: ser inde-

pendiente de la dureza del material, tener tasas de eliminación relativamente altas, permitir el mecanizado de piezas con geometrías complejas y con acabados superficiales de alta calidad. Una de las características más importantes de los materiales cerámicos es su resistencia al desgaste, en comparación con otros materiales. Dicha resistencia al desgaste presenta gran importancia en diversas aplicaciones industriales tales como: matrices para procesos de conformado por deformación plástica, herramientas de corte y componentes para maquinaria empleada en procesos de sinterización.

En los trabajos desarrollados por los presentes autores^[11-13] se ha incidido en la obtención de las superficies de respuesta de características

(*) Trabajo recibido el día 6 de agosto de 2003 y aceptado en su forma final el día 11 de octubre de 2004.

(*) Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales. ETSIT - Universidad Pública de Navarra, c/ Campus Arrosadía s/n; Código Postal: 31006, Pamplona, España. Email: inaki.puerta@unavarra.es

tecnológicas tales como rugosidad (Ra, Rt), desgaste de electrodo (EW) y tasa de eliminación de material (MRR).

En el presente trabajo se estudia la calidad superficial obtenida en la EDM de carburo de boro prensado en caliente (B_4C), carburo de silicio infiltrado con silicio ($SiSiC$) y carburo de wolframio en matriz metálica de cobalto ($WC-Co$). Para ello, se realiza un estudio relativo a la calidad superficial de los tres materiales cerámicos mencionados anteriormente para el caso de mecanizado de acabado, es decir, a bajos regímenes de energía suministrados por el generador de la máquina.

2. MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS

Los materiales cerámicos conductores utilizados en los ensayos de electroerosión han sido: el carburo de boro, prensado en caliente, el carburo de silicio, infiltrado con silicio, y el carburo de wolframio, disperso en una matriz metálica de cobalto. La selección de estos materiales cerámicos técnicos se llevó a cabo debido a las aplicaciones emergentes en el ámbito industrial de los mismos^[10], a consecuencia de sus excepcionales propiedades físicas y químicas, como se mostrará en este apartado.

Para fabricar las muestras de carburo de boro se partió de material prensado en caliente, ya que permite obtener una densidad muy próxima a la teórica ($2,51 \text{ g/cm}^3$) a la vez que un buen comportamiento mecánico, en forma de una resistencia a la compresión a temperatura ambiente elevada (2.855 MPa) y de una alta dureza (37 GPa). Sin embargo, dicho proceso resulta algo más costoso que otros posibles y, además, está limitado en cuanto a la sencillez de las formas de las muestras a fabricar. Las temperaturas de sinterizado para el carburo de boro están comprendidas entre 1.900 y $2.200 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que las presiones oscilan entre 20 y 40 MPa . Todo ello se lleva a cabo bajo una atmósfera de argón y se aconseja un tiempo de mantenimiento de la temperatura y presiones máximas de 15 a 45 min .

El carburo de silicio empleado en los experimentos fue obtenido por reacción REFEL F[®], que es su marca comercial registrada más usual. Su proceso de fabricación consiste en la infiltración de silicio en un bloque poroso, formado de polvo de carburo de silicio y carbono, que se somete posteriormente a un proceso de curado a una determinada temperatura. Esto produce aproximadamente un 10% de silicio libre, que rellena los poros. La microestructura resultante tiene una porosidad baja y

un grano muy fino, dando lugar a una densidad de $3,1 \text{ g/cm}^3$. El material presenta una resistencia mecánica a compresión comprendida entre 2.000 MPa y 3.500 MPa , y una dureza *Vickers* de 25 a 35 GPa .

El tercer material cerámico empleado en los ensayos fue el carburo de wolframio ($94WC-6Co$), con una dureza *Vickers* de $15,5 \text{ GPa}$ y una resistencia a la compresión de 5.450 MPa . Dicho material se ha fabricado a partir de un proceso de pulvimetalurgia en el que la fase de sinterizado se desarrolla a temperaturas que oscilan entre 1.300 y $1.600 \text{ }^\circ\text{C}$, realizándose, la mayor parte de las veces, en vacío.

En todos los casos se partió de material en forma de placa con unas dimensiones de $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}$, a excepción del carburo de silicio que se empleó con unas dimensiones de $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}$.

El equipo empleado para llevar a cabo la electroerosión de los diferentes materiales cerámicos seleccionados en el presente trabajo fue una máquina convencional de electroerosión por penetración del tipo ONA DATIC D-2030-S. Para asegurar la adecuada limpieza de la zona del *gap* de la viruta del proceso de mecanizado, se utilizó un sistema de lanza articulada. La presión de salida del dieléctrico empleada para el caso del carburo de boro fue de $4 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$, mientras que la empleada para los casos del carburo de silicio y del carburo de wolframio fue de $2 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$. La presión utilizada para el carburo de boro es superior debido a la elevada viscosidad de la masa fundida de dicho material cerámico, que dificulta la evacuación de la misma^[13].

Los electrodos seleccionados para todos los casos fueron de cobre electrolítico, con forma prismática y con dimensiones de $8 \times 12 \text{ mm}$, para su área transversal. Se emplearon electrodos de cobre ya que, para el caso de la EDM de materiales cerámicos, éstos dan lugar, en general, a unos mejores acabados superficiales que frente a otros electrodos como pueden ser los de grafito^[10]. Por otra parte, se ha constatado experimentalmente que es preferible la utilización de una polaridad positiva para el electrodo en el caso del carburo de boro, ya que el proceso de mecanizado se lleva a cabo así de una manera mucho más estable^[13], mientras que en el resto de los otros dos casos se usó una polaridad negativa^[11 y 14].

Una vez llevados a cabo los diversos experimentos de electroerosión, se observaron las huellas de mecanizado de los mismos, producidas sobre la superficie de las placas de los distintos materiales

cerámicos, empleando microscopía óptica (microscopio Olympus, BX40). El estudio mediante SEM se llevó a cabo en un microscopio electrónico de barrido, equipado con una micro-sonda de rayos X (JEOL JSM-5900LV).

3. DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Los parámetros de diseño considerados en el presente trabajo son: la intensidad (I), el tiempo de impulso (t_i) y el rendimiento de ciclo (η), ya que son los factores más importantes y los más ampliamente utilizados en el campo de la electroerosión por penetración^[15].

La intensidad (I) representa los diferentes niveles de potencia que el generador de la máquina de electroerosión es capaz de suministrar. El valor de este factor suele representar el valor máximo de la intensidad de la corriente de descarga, es decir, la intensidad de pico (I_p). El tiempo de impulso (t_i) se define como la cantidad de tiempo por cada ciclo (expresada en μs) durante la cual se permite el flujo de la corriente eléctrica. El rendimiento de ciclo (η) es la relación entre el tiempo de impulso (t_i) y el tiempo total de ciclo, que es el tiempo de impulso junto con el tiempo de pausa ($t_i + t_o$).

Las variables de respuesta utilizadas han sido: la rugosidad superficial, la tasa de eliminación de material (MRR) y el desgaste del electrodo (EW). Dichas variables se seleccionaron debido a que hacen referencia a la calidad superficial de las piezas fabricadas, a la velocidad del proceso y al rendimiento de los electrodos, respectivamente.

Con la finalidad de medir la rugosidad superficial, se ha empleado un rugosímetro electrónico de palpador móvil (ALPA RT-70), con un alcance de $320 \mu m$ y una apreciación de $0,01 \mu m$. En este trabajo se ha empleado un filtro 2RC corregido en fase ya que, según se recoge en la norma UNE-EN-ISO 11562: 1998^[16], no causa desfases y no produce distorsiones asimétricas del perfil. La velocidad de avance de la unidad a la hora de realizar la medición ha sido de 1 mm/s , mientras que la velocidad de retorno de 2 mm/s . Se ha empleado en la punta un cono de diamante que forma un ángulo de 90° y tiene un radio en su extremo de $3 \mu m$, siendo la fuerza ejercida por el palpador de $12 \cdot 10^{-5} \text{ N}$.

Los parámetros de rugosidad que se han evaluado en este estudio son: la desviación media aritmética del perfil de rugosidad (R_a), la desviación media cuadrática del perfil de rugosidad (R_q) y la altura total del perfil de rugosidad (R_t)^[17].

Se define el parámetro de rugosidad R_a , según la ecuación 1, como la media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas $Z(x)$ (donde $Z(x)$ es la altura del perfil evaluado en una posición cualquiera "x") que se encuentran comprendidas en una longitud de muestreo " l_r ".

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (1)$$

Se define el parámetro de rugosidad R_q , según la ecuación 2, como la media cuadrática de los valores de las ordenadas $Z(x)$ que están comprendidas en una longitud de muestreo.

$$R_q = \frac{1}{l_r} \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad (2)$$

Se define el parámetro de rugosidad R_t como la suma de la mayor altura de pico, Z_p , y de la mayor profundidad de valle, Z_v , del perfil, comprendidas en la longitud de evaluación " l_n " (donde dicha longitud, en la dirección del eje X, es la utilizada para evaluar el perfil y puede comprender una o varias longitudes de muestreo).

Se empleó en todos los casos una longitud de medida de $6,4 \text{ mm}$ ($8 \cdot 0,8 \text{ mm}$), siendo 8 el número de longitudes de muestreo y 0,8 el valor del *cut-off* utilizado. Los valores de los parámetros de rugosidad, para cada experimento en particular, se obtuvieron a partir de la media aritmética de los valores de las mediciones realizadas según tres direcciones paralelas y distribuidas de forma equidistante a lo largo del área electroerosionada.

La tasa de eliminación de material (MRR), es decir, volumen de material eliminado de la pieza dividido por el tiempo de mecanizado, se calculó mediante la diferencia del peso de la muestra antes y después de cada proceso de electroerosión.

En lo que respecta a la medida del desgaste del electrodo, se determinó como la relación existente entre el volumen de material eliminado del electrodo y el volumen de material eliminado de la pieza. Para calcular la pérdida en volumen del material eliminado del electrodo, se procedió de forma análoga al anterior parámetro.

Con objeto de reducir el número de experimentos, se empleó un diseño factorial 2^k ya que, con gran diferencia, son los más ampliamente utilizados en el campo de la industria y de la investigación^[18]. El diseño de experimentos utilizado fue un diseño central compuesto con tres factores

(esto es, $k = 3$ y por consiguiente, con $2^3 = 8$ experimentos factoriales), cuatro puntos centrales y seis puntos estrella (dos puntos estrella por cada factor) situados en los centros de las caras del cubo, es decir, un total de 18 experimentos.

En la tabla I se muestra la relación de los factores de diseño y sus correspondientes niveles de variación seleccionados. Se seleccionaron unos niveles de intensidad de 3 y 5 (2 A y 6 A, respectivamente) para el caso del factor de la intensidad, unos niveles de 10 μs y 50 μs , para el caso del factor de tiempo de impulso, y unos niveles de 0,4 y 0,6 para el rendimiento de ciclo, ya que el diseño que se empleó precisa de dos niveles de variación para cada factor utilizado. En la tabla II se puede observar la matriz de diseño resultante para el tipo de experimento seleccionado (en este caso, un diseño central compuesto con tres factores, también denominado como diseño de segundo orden, ya que considera los efectos cuadráticos de cada uno de los factores^[18]), así como las observaciones para las cinco variables de respuesta que se consideran,

Tabla I. Factores y niveles seleccionados

Table I. Factors and levels selected

Factores	Niveles	
	-1	+1
I (n°)	3	5
t _i (μs)	10	50
η	0,4	0,6

donde los valores de intensidad 3, 4 y 5 equivalen a 2 A, 4 A y 6 A, respectivamente.

4. CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA

Para el estudio de la calidad superficial se empleó, en primer lugar, microscopía óptica. La medida de la rugosidad superficial de la placa inicial de carburo de boro, sin electroerosionar, dio como resultado unos valores de Ra, Rq y Rt de 0,19 μm , 0,25

Tabla II. Matriz de diseño de las variables de respuesta para los materiales cerámicos considerados

Table II. Design matrix of response variables for the considered ceramic materials

I	t _i (μs)	η	B ₄ C					SiSiC					WC-Co					
			Ra (μm)	Rq (μm)	Rt (μm)	EW (%)	MRR (mm^3/min)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rt (μm)	EW (%)	MRR (mm^3/min)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rt (μm)	EW (%)	MRR (mm^3/min)	
1	3	10	0,4	1,38	1,73	12,79	1,93	0,135	0,89	1,12	7,85	9,47	0,092	0,66	0,83	5,72	36,51	0,055
2	5	10	0,4	1,30	1,62	10,51	3,10	0,187	1,09	1,39	9,87	8,80	0,213	1,24	1,57	11,30	15,32	0,248
3	3	50	0,4	2,27	2,87	19,46	0,26	0,159	0,75	0,94	6,63	16,18	0,024	0,66	0,82	5,46	71,58	0,012
4	5	50	0,4	2,16	2,69	16,62	0,59	0,206	1,17	1,53	11,85	8,92	0,118	1,93	2,47	16,62	12,09	0,202
5	3	10	0,6	1,41	1,76	11,33	2,07	0,328	0,86	1,08	6,77	10,60	0,139	0,65	0,82	6,12	35,25	0,090
6	5	10	0,6	1,26	1,58	9,77	3,38	0,357	1,23	1,59	10,76	11,82	0,331	1,37	1,71	11,51	15,54	0,428
7	3	50	0,6	2,03	2,52	15,31	0,30	0,339	0,82	1,03	7,05	14,90	0,043	0,64	0,81	6,30	71,77	0,020
8	5	50	0,6	2,06	2,57	15,78	0,39	0,396	1,86	2,47	19,04	8,04	0,378	2,02	2,59	16,94	11,09	0,318
9	3	30	0,5	1,56	2,00	13,96	1,04	0,183	0,84	1,06	7,37	13,03	0,047	0,64	0,81	5,61	66,41	0,026
10	5	30	0,5	1,68	2,13	13,79	0,80	0,261	1,34	1,70	11,31	8,92	0,234	1,75	2,17	13,92	11,02	0,279
11	4	10	0,5	1,34	1,68	10,60	2,84	0,290	1,20	1,52	10,78	8,07	0,339	1,11	1,43	10,39	17,34	0,236
12	4	50	0,5	1,92	2,41	14,73	0,50	0,250	1,26	1,63	10,92	8,25	0,159	1,73	2,19	16,40	15,21	0,155
13	4	30	0,4	1,68	2,12	13,53	1,01	0,171	1,24	1,58	9,72	8,17	0,147	1,43	1,80	11,57	14,93	0,147
14	4	30	0,6	1,51	1,90	12,07	0,91	0,341	1,34	1,73	11,78	8,68	0,254	1,54	1,95	13,45	13,35	0,246
15	4	30	0,5	1,77	2,18	12,41	0,77	0,283	1,34	1,71	12,29	8,42	0,190	1,43	1,83	12,89	14,29	0,193
16	4	30	0,5	1,83	2,26	14,59	0,69	0,282	1,33	1,70	11,76	8,45	0,192	1,34	1,71	12,26	14,15	0,192
17	4	30	0,5	1,77	2,19	13,06	1,02	0,277	1,30	1,66	12,01	8,59	0,180	1,39	1,75	10,65	14,08	0,194
18	4	30	0,5	1,78	2,20	13,43	0,88	0,274	1,37	1,76	11,74	8,29	0,203	1,42	1,79	11,94	14,09	0,194

μm y $2,34 \mu\text{m}$, respectivamente. Dicha medida se realizó en la dirección perpendicular a las estrías de mecanizado, según se recoge en la norma UNE-EN-ISO 13565-1: 1998 [19].

La micrografía de la figura 1 muestra la superficie de la cerámica de carburo de boro, una vez que se ha llevado a cabo el proceso de electroerosión sobre la misma. Dicha figura corresponde al experimento con el que se obtuvieron menores valores de los parámetros de rugosidad R_a , R_q y R_t , es decir, $1,26$, $1,58$ y $9,77 \mu\text{m}$, respectivamente. En la figura 1 se puede ver el aspecto superficial, en forma de cráteres, característico de los procesos de electroerosión por penetración. Además, en este experimento se obtuvo también el valor más elevado para la variable de desgaste del electrodo ($EW = 3,38 \%$). Ello es debido a que valores pequeños de la rugosidad superficial, obtenidos en este caso a través de un valor bajo del tiempo de impulso, dan lugar al mismo tiempo a valores elevados del desgaste del electrodo, ya que éste depende sobretodo de la frecuencia del pulso y, en menor medida, de la cantidad de energía del mismo.

En la figura 2 se muestra el aspecto superficial correspondiente al experimento $I = 3$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ y $\eta = 0,4$, con el que se obtienen los mayores valores para los distintos parámetros de rugosidad empleados, es decir, $R_a = 2,27 \mu\text{m}$, $R_q = 2,87 \mu\text{m}$ y $R_t = 19,46 \mu\text{m}$. Además, en este experimento también se obtuvo el menor valor para la variable de desgaste del electrodo ($EW = 0,26 \%$). La obtención de los mayores valores de rugosidad superficial es debido, en este caso, a la utilización de un tiempo

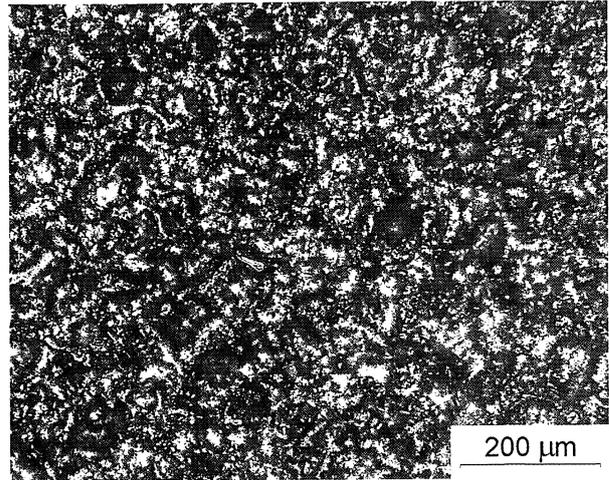


Figura 2. Micrografía óptica de B_4C del experimento $I = 3$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ y $\eta = 0,4$.

Figure 2. B_4C optical micrograph of experiment $I = 3$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ and $\eta = 0,4$.

de impulso elevado, dentro del intervalo de trabajo considerado, y, por lo tanto, a pulsos más energéticos. Por otro lado, al ser pulsos de baja frecuencia, el valor del desgaste tiende a disminuir. La micrografía de la figura 2 presenta una mayor extensión de las zonas desenfocadas debido, en parte, a la mayor rugosidad superficial con respecto al resto de los experimentos.

La medida de la rugosidad superficial de la placa inicial de carburo de silicio, sin electroerosión, dio como resultado unos valores de R_a , R_q y R_t de $0,22 \mu\text{m}$, $0,28 \mu\text{m}$ y $2,16 \mu\text{m}$, respectivamente. En la figura 3 se muestra la superficie del

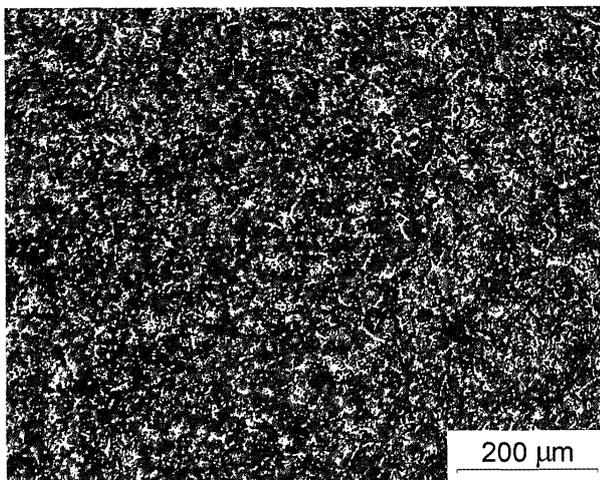


Figura 1. Micrografía óptica de B_4C del experimento $I = 5$, $t_i = 10 \mu\text{s}$ y $\eta = 0,6$.

Figure 1. B_4C optical micrograph of experiment $I = 5$, $t_i = 10 \mu\text{s}$ and $\eta = 0,6$.

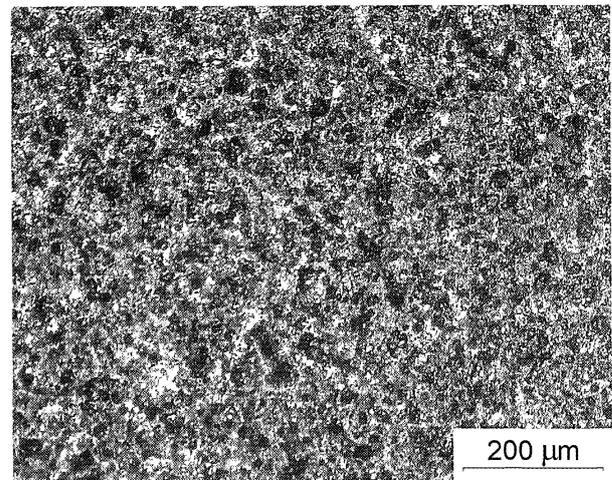


Figura 3. Micrografía óptica de SiC del experimento $I = 3$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ y $\eta = 0,4$.

Figure 3. SiC optical micrograph of experiment $I = 3$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ and $\eta = 0,4$.

carburo de silicio una vez que se ha llevado a cabo el proceso de electroerosión. Dicha figura se corresponde al experimento con el que se obtuvieron los valores más pequeños para los tres parámetros de rugosidad empleados en este trabajo ($R_a = 0,75 \mu\text{m}$, $R_q = 0,94 \mu\text{m}$, y $R_t = 6,63 \mu\text{m}$). Las pequeñas zonas desenfocadas que se presentan son debidas al relieve de la superficie. Además, en este experimento se obtuvo también el valor más elevado para la variable de desgaste del electrodo ($EW = 16,18 \%$), así como el valor más pequeño para la variable de la tasa de eliminación de material ($MRR = 0,024 \text{ mm}^3/\text{min}$). En este caso se obtuvieron valores bajos de la rugosidad superficial debido al empleo de un valor bajo de la intensidad (que da lugar a pulsos menos energéticos) y, en menor medida, del rendimiento de ciclo, dentro del intervalo de trabajo considerado. Por otro lado, el empleo de valores bajos del rendimiento de ciclo es equivalente a tiempos de pausa elevados, que generan, a su vez, valores más pequeños de la tasa de eliminación de material.

La figura 4 se corresponde con el experimento $I = 5$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ y $\eta = 0,6$, en el que se obtuvieron los mayores valores para los parámetros de rugosidad estudiados en este trabajo ($R_a = 1,86 \mu\text{m}$, $R_q = 2,47 \mu\text{m}$ y $R_t = 19,04 \mu\text{m}$). Ello es debido a que se ha empleado un valor elevado de la intensidad, así como un tiempo de pausa más pequeño que genera inestabilidades en el proceso EDM y, por consiguiente, peores acabados superficiales. Por otro lado, para dicho experimento se obtuvieron, además, el menor valor para el caso del parámetro de

desgaste del electrodo ($EW = 8,04 \%$), así como el mayor valor para la variable de la tasa de eliminación de material ($MRR = 0,378 \text{ mm}^3/\text{min}$). En la figura 4 el tamaño de los cráteres superficiales es mayor que en el caso de la figura 3, que se correspondía con el experimento de rugosidad obtenida más pequeña. Como ya se ha indicado, lo anterior es consecuencia del empleo de unos pulsos más energéticos y de un menor tiempo de pausa entre dichos pulsos.

La medida de la rugosidad superficial de la placa inicial de carburo de wolframio, sin electroerosionar, dio unos valores de R_a , R_q y R_t de $0,73 \mu\text{m}$, $0,93 \mu\text{m}$ y $6,16 \mu\text{m}$, respectivamente. En la figura 5 se presenta la superficie una vez que se ha llevado a cabo el proceso de electroerosión sobre la misma. Dicha figura corresponde a uno de los dos experimentos que dieron lugar a los valores más pequeños para los parámetros de rugosidad R_a y R_q ($R_a = 0,64 \mu\text{m}$ y $R_q = 0,81 \mu\text{m}$). Lo anterior es consecuencia del empleo de un valor bajo de la intensidad ($I = 3$), dentro del intervalo de trabajo considerado, dando lugar así a tamaños menores de pulsos de energía que producen un mejor acabado superficial. Las pequeñas zonas desenfocadas que se pueden apreciar son debidas al relieve de la superficie. En este experimento se obtuvo también el valor más elevado de desgaste del electrodo ($EW = 71,77 \%$), así como el segundo valor más pequeño para la tasa de eliminación de material ($MRR = 0,020 \text{ mm}^3/\text{min}$). Las condiciones de proceso que dan lugar a buenos acabados superficiales producen, a su vez, valores altos de desgaste en

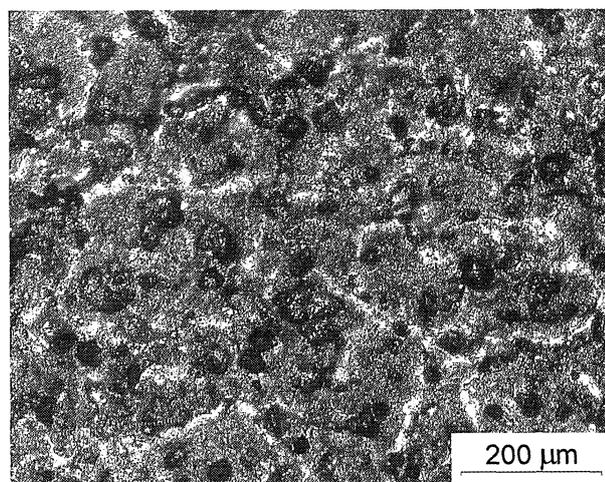


Figura 4. Micrografía óptica de SiC del experimento $I = 5$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ y $\eta = 0,6$.

Figure 4. SiC optical micrograph of experiment $I = 5$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ and $\eta = 0,6$.

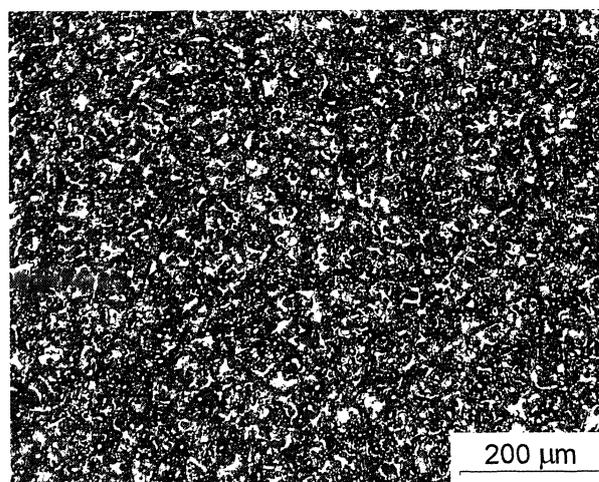


Figura 5. Micrografía óptica de WC-Co del experimento $I = 3$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ y $\eta = 0,6$.

Figure 5. WC-Co optical micrograph of experiment $I = 3$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ and $\eta = 0,6$.

electrodo junto con velocidades de proceso pequeñas, debido al empleo, en este caso, de un valor bajo de intensidad ($I = 3$).

La figura 6 corresponde al experimento $I = 5$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,6$, que fue en el que se obtuvieron los mayores valores para los parámetros de rugosidad empleados en este trabajo ($R_a = 2,02 \mu m$, $R_q = 2,59 \mu m$ y $R_t = 16,94 \mu m$). Además, en dicho experimento se obtuvo un valor de desgaste del electrodo $EW = 11,09 \%$, que es prácticamente igual que el valor más pequeño de desgaste ($EW = 11,02 \%$) que se obtuvo en los experimentos realizados sobre el carburo de wolframio. Tanto la obtención de un peor acabado superficial como la disminución en el desgaste del electrodo, son debidos al uso de un régimen de energía más elevado, a través del aumento del valor de la intensidad. En este caso, se puede apreciar, a partir de las condiciones de proceso de este experimento y del anterior, la poca influencia que tienen el tiempo de impulso y el rendimiento de ciclo sobre la calidad superficial y el desgaste del electrodo, ya que ambos factores permanecen fijos. En la figura 6 el tamaño de los cráteres superficiales es, por lo tanto, mayor que para el caso de la figura 5, que se correspondía con el experimento en el que se obtuvieron los valores más pequeños de R_a y R_q .

5. CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Las micrografías se obtuvieron, en la mayor parte de los casos, mediante el empleo de electrones se-

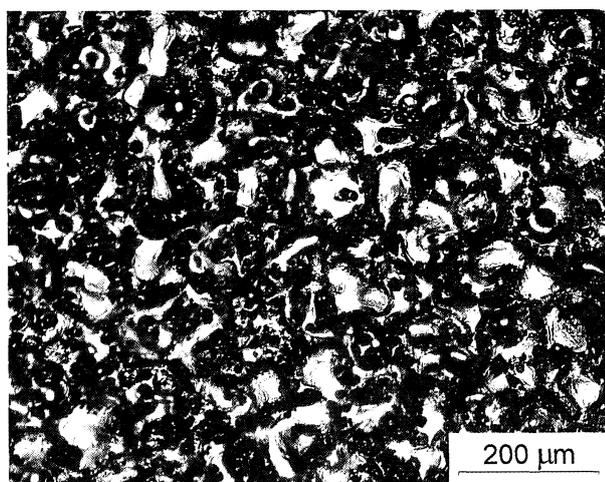


Figura 6. Micrografía óptica de WC-Co del experimento $I = 5$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,6$.

Figure 6. WC-Co optical micrograph of experiment $I = 5$, $t_i = 50 \mu s$ and $\eta = 0,6$.

Rev. Metal. Madrid 40 (2004) 447-457

cundarios, no siendo necesario llevar a cabo ningún tipo de preparación de las mismas, debido a su adecuada conductividad.

La figura 7 corresponde al experimento en el que se obtuvo el menor valor de la rugosidad superficial para el carburo de boro ($I = 5$, $t_i = 10 \mu s$ y $\eta = 0,6$). En dicha figura se puede apreciar que la superficie electroerosionada se encuentra llena de cráteres superficiales y de material cerámico resolidificado, a lo largo de toda la muestra.

Se puede ver que la capa superficial está compuesta por gran cantidad de material que ha sido fundido y se ha vuelto a resolidificar. Esto puede ser debido a que el carburo de boro, una vez fundido, no es expulsado al medio dieléctrico sino que recupera su rigidez sobre la superficie de la pieza^[20]. Este hecho podría deberse a los elevados puntos de vaporización ($3.500 \text{ }^\circ\text{C}$) y de fusión ($2.450 \text{ }^\circ\text{C}$) del carburo de boro, así como a la elevada viscosidad de la masa fundida de material cerámico. En la figura 7 se puede apreciar que en la capa resolidificada aparecen defectos superficiales, tales como cráteres y grietas de pequeño tamaño.

La figura 8 corresponde al experimento en el que se obtuvieron mayores valores de rugosidad superficial ($I = 3$, $t_i = 50 \mu s$, $\eta = 0,4$). En este caso, la cantidad de material resolidificado es mayor que en el experimento anterior, y está distribuida menos uniformemente en la superficie. Además, el tamaño de los defectos superficiales de tipo cráter, así como la longitud de las grietas presentes, son, desde un punto de vista cualitativo, bastante mayores que en el experimento de menor rugosidad. Ello es debido a la disminución en la frecuencia

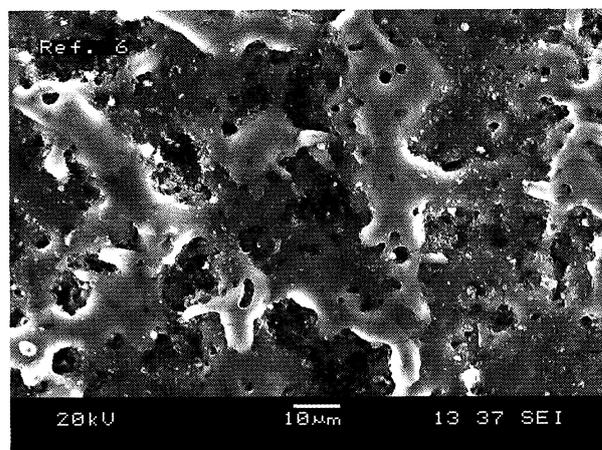


Figura 7. Micrografía SEM de B_4C del experimento $I = 5$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,6$.

Figure 7. B_4C SEM micrograph of experiment $I = 5$, $t_i = 50 \mu s$ and $\eta = 0,6$.

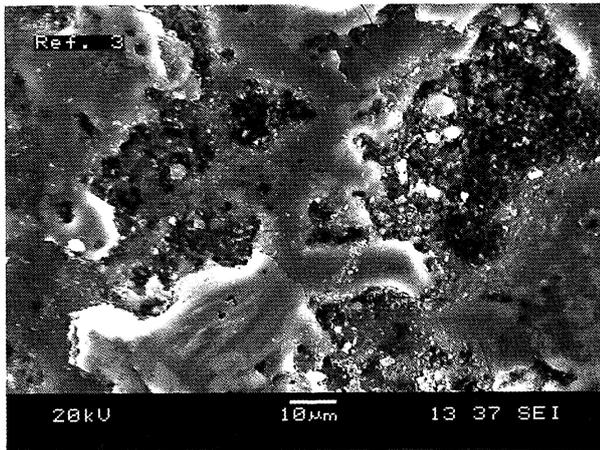


Figura 8. Micrografía SEM de B_4C del experimento $I = 3$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,4$.

Figure 8. B_4C SEM micrograph of experiment $I = 3$, $t_i = 50 \mu s$ and $\eta = 0,4$.

de los pulsos, a través del aumento del tiempo de impulso.

La figura 9 muestra el experimento en el que se obtuvo el menor valor de la rugosidad superficial para el carburo de silicio ($R_a = 0,75 \mu m$, $R_q = 0,94 \mu m$ y $R_t = 6,63 \mu m$), es decir, el experimento $I = 3$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,4$.

La figura 10 se corresponde con el experimento de mayor rugosidad superficial obtenida para el carburo de silicio ($I = 5$, $t_i = 50 \mu s$, $\eta = 0,6$). El tamaño de los defectos superficiales de tipo cráteres, en este caso, mucho mayor que para el caso del experimento anterior, correspondiente al de los valores de menor rugosidad superficial obtenidos, como

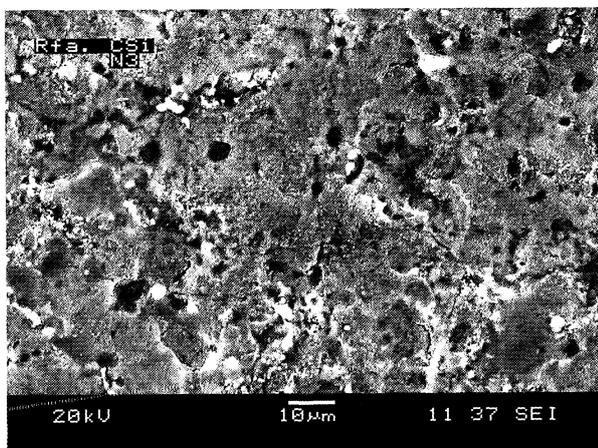


Figura 9. Micrografía SEM de SiC del experimento $I = 3$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,4$.

Figure 9. SiC SEM micrograph of experiment $I = 3$, $t_i = 50 \mu s$ and $\eta = 0,4$.

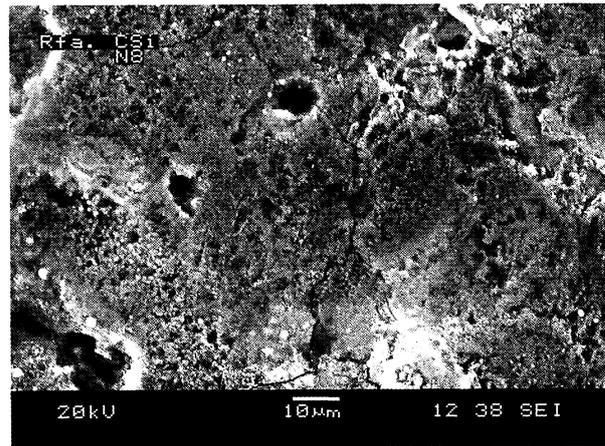


Figura 10. Micrografía SEM de SiC del experimento $I = 5$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,6$.

Figure 10. SiC SEM micrograph of experiment $I = 5$, $t_i = 50 \mu s$ and $\eta = 0,6$.

ya se había puesto de manifiesto en el estudio de la microscopía óptica. Además, mediante el estudio con microscopía electrónica, se puede apreciar una gran cantidad de grietas superficiales, de gran tamaño, a lo largo de toda la muestra. Lo anterior es consecuencia del empleo de pulsos más energéticos y de mayor frecuencia.

El análisis químico con la micro-sonda EDS de rayos X determinó que las zonas brillantes que se encuentran en torno a los cráteres superficiales son zonas con menor contenido de carbono y más presencia de silicio que las zonas oscuras del interior de los mismos, lo que podría ser compatible, en un principio, con la posibilidad de que los cráteres hubieran sido ocupados anteriormente por granos de carburo de silicio, rodeados por la matriz de silicio (zonas brillantes con mayor contenido de silicio). Lo anterior estaría de acuerdo con el mecanismo de eliminación de material para el caso del carburo de silicio SiC que se recoge en los trabajos de König *et al* [21]. Según estos investigadores, en la electroerosión del carburo de silicio, infiltrado con silicio, se produce una superficie porosa en la que la fase de aglutinante ha sido eliminada, mientras que los granos de carburo de silicio permanecen expuestos.

De todas formas, aunque, a primera vista, todo lo dicho anteriormente parece que sirviera para apoyar las afirmaciones de los investigadores anteriores, hay que tener en cuenta también el hecho de que no se ha observado la existencia clara de granos de carburo de silicio expuestos. Además, hay que tener cuidado con el análisis químico

llevado a cabo con la sonda de rayos X, para el caso de elementos de bajo número atómico tal como el carbono, ya que su análisis no puede considerarse como concluyente. Por consiguiente, teniendo en cuenta estas dos últimas afirmaciones, los autores del presente trabajo se inclinan más a pensar en la existencia de una única fase de aspecto bastante poroso, tras el proceso de la electroerosión, en contra de lo expuesto en los trabajos de König *et al* [21].

En el carburo de wolframio se aprecian dos fases claramente diferenciadas, tras el proceso de la electroerosión, que se corresponden con las fases, existentes inicialmente, de carburo de wolframio en una matriz metálica de cobalto. Esto fue posible verificarlo con la ayuda de la representación topográfica de la superficie a partir de los electrones retrodispersados.

En la figura 11 se puede ver una comparativa de dos micrografías del carburo de wolframio y del experimento $I = 3$, $t_i = 10 \mu s$ y $\eta = 0,6$. Dichas micrografías se han obtenido mediante electrones retrodispersados en modo composición y electrones secundarios, respectivamente. En dicha figura, cuya correspondencia entre los dos tipos de imágenes presentados es idéntica, se puede apreciar una fase compuesta por zonas porosas, correspondiente a la matriz metálica de cobalto, y otra de zonas topográficamente más elevadas, que se corresponde con los granos de carburo de wolframio.

La diferenciación entre las dos fases fue refrendada también mediante el análisis del espectro de

rayos X, realizado sobre la zona que se representa en la micrografía de la figura 11. En dicho espectro se pudo verificar que las zonas oscuras tenían un mayor contenido de cobalto y cobre (zonas porosas) y que, por el contrario, las zonas que presentan un aspecto más brillante (zonas más elevadas) poseían un mayor contenido de wolframio. Además, se pudieron apreciar también en el espectro de rayos X trazas de cobre que, en principio, procedería del material empleado en la fabricación de los electrodos usados en el proceso de la electroerosión.

La figura 12 se corresponde con el experimento en el que se obtuvieron los menores valores de rugosidad superficial para los parámetros Ra y Rq en el caso del carburo de wolframio, es decir, el experimento $I = 3$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,6$.

En la figura 13 se puede apreciar el aspecto superficial correspondiente al experimento en el que se obtuvieron los mayores valores de la rugosidad superficial ($I = 5$, $t_i = 50 \mu s$, $\eta = 0,6$), para todos los parámetros estudiados. En esta micrografía el tamaño de los cráteres y las grietas de la zona más porosa del material es considerablemente más grande que para el caso de la micrografía del experimento en el que se obtuvo el menor valor de rugosidad superficial (figura 12). Ello se debe al uso de un valor elevado de la intensidad de los pulsos ($I = 5$), dentro del intervalo de variación considerado, que produce un empeoramiento del aspecto superficial y, por lo tanto, un aumento del número y tamaño de los defectos superficiales.

El hecho de que la matriz de cobalto de lugar a una superficie porosa llena de defectos, mientras

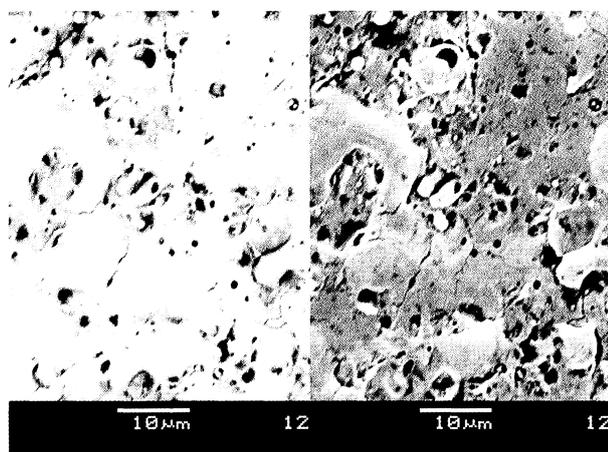


Figura 11. Micrografías SEM comparativas de WC-Co de electrones retrodispersados (izquierda) y secundarios (derecha) del experimento $I = 3$, $t_i = 10 \mu s$ y $\eta = 0,6$.

Figure 11. WC-Co comparative SEM micrographs of backscattered (left) and secondary (right) electrons of experiment $I = 3$, $t_i = 10 \mu s$ and $\eta = 0,6$.

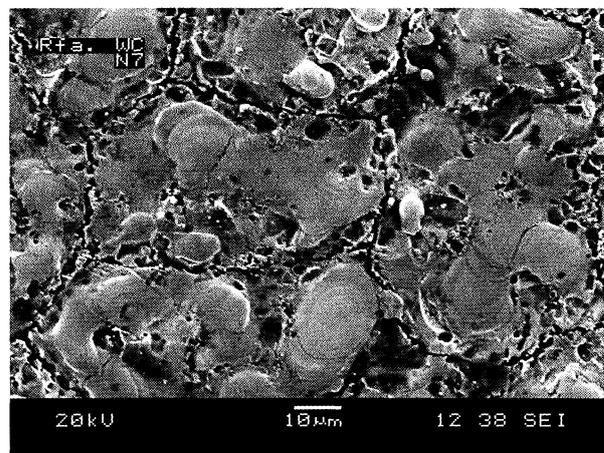


Figura 12. Micrografía SEM de WC-Co del experimento $I = 3$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,6$.

Figure 12. WC-Co SEM micrograph of experiment $I = 3$, $t_i = 50 \mu s$ and $\eta = 0,6$.

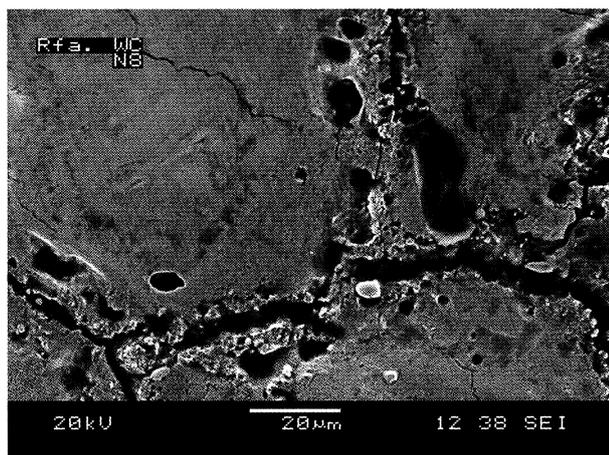


Figura 13. Micrografía SEM de WC-Co del experimento $I = 5$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,6$.

Figure 13. WC-Co SEM micrograph of experiment $I = 5$, $t_i = 50 \mu s$ and $\eta = 0,6$.

que los granos de carburo de wolframio se queden expuestos de forma que tiendan a sobresalir, se debe a que la matriz metálica de cobalto posee una resistividad eléctrica ($6,34 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y una temperatura de fusión ($1.495 \text{ }^\circ\text{C}$) que son inferiores a las del carburo de wolframio ($53 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y $2.800 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente), lo que hace que ésta sea eliminada por procesos de fusión y vaporización, mucho más preferentemente.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio relativo a cómo afectan las condiciones de proceso sobre el acabado superficial para el caso de tres de los materiales cerámicos, con un mayor número de aplicaciones industriales, que son factibles de ser mecanizados mediante procesos de electroerosión por penetración, es decir, carburo de boro prensado en caliente, carburo de silicio infiltrado con silicio y carburo de wolframio en matriz metálica de cobalto.

Como se ha demostrado, es posible, mediante la selección adecuada de los parámetros del proceso, obtener buenos acabados superficiales para los tres materiales cerámicos considerados.

Para el caso del carburo de boro, los menores valores de rugosidad se obtienen para $I = 6 \text{ A}$, $t_i = 10 \mu s$ y $\eta = 0,6$, mientras que los mayores valores de rugosidad se consiguen para $I = 2 \text{ A}$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,4$. En este caso, el aumento del tiempo de impulso conduce a un empeoramiento de la calidad superficial, debido a la disminución de la frecuencia de los pulsos. Por otro lado, los valores más altos de rugosidad se consiguen con un valor

bajo de la intensidad ($I = 2 \text{ A}$), lo que no concuerda con la experiencia que se tiene para los materiales metálicos.

En el carburo de silicio y en el carburo de wolframio, los valores de rugosidad más altos se corresponden para $I = 6 \text{ A}$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,6$. Ello es debido al aumento de la energía o tamaño de los pulsos (mediante el aumento de la intensidad y del tiempo de impulso) así como a la disminución de su frecuencia. Con respecto a los valores menores de rugosidad, en el caso del carburo de silicio se obtienen para $I = 2 \text{ A}$, $t_i = 50 \mu s$ y $\eta = 0,4$. En el caso del carburo de wolframio el menor valor para uno de los parámetros de rugosidad estudiados (R_t) también se obtiene en este experimento, mientras que los otros dos parámetros (R_a y R_q) tienen valores prácticamente similares a los valores más pequeños obtenidos para éstos.

La razón de este comportamiento similar, en lo que se refiere a acabado superficial, para estos dos últimos materiales cerámicos, es debido a que presentan dos fases claramente diferenciadas, mientras que el carburo de boro es un material cerámico monolítico.

Se ha observado mediante microscopía electrónica de barrido que los regímenes de mecanizado que dan lugar a una rugosidad superficial o a una tasa de eliminación más elevadas originan, a su vez, defectos superficiales de mayor tamaño así como una cantidad mayor de material resolidificado.

Además, en el caso particular del carburo de boro, se ha visto que la capa superficial se encuentra formada por gran cantidad de material que ha sido fundido y se ha vuelto a resolidificar varias veces. Este hecho es una consecuencia directa de los elevados puntos de vaporización ($3.500 \text{ }^\circ\text{C}$) y de fusión ($2.450 \text{ }^\circ\text{C}$) del carburo de boro, así como de la elevada viscosidad de la masa fundida de material cerámico.

En el caso del carburo de silicio se ha constatado únicamente la existencia de una superficie electroerosionada composicionalmente más o menos uniforme y bastante porosa.

Por otro lado, en el caso del carburo de wolframio, si que es posible apreciar, de una forma clara, dos fases diferenciadas tras el proceso EDM formadas por granos de carburo de wolframio y una matriz metálica de cobalto. Además, se ha podido constatar que dicho material presenta una eliminación preferencial de la fase metálica de cobalto, debido a su inferior temperatura de fusión ($1.495 \text{ }^\circ\text{C}$), en relación con la del carburo de wolframio ($2.800 \text{ }^\circ\text{C}$).

REFERENCIAS

- [1] F. PETROFES y A.M. GADALLA, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 67 (1988) 1.048-1.052.
- [2] M. RAMULU y J.L. GARBINI, *J. Eng. Mater. T. ASME* 113 (1991) 437-442.
- [3] T.C. LEE y W.S. LAU, *Mater. Manuf. Process.* 6 (1991) 635-648.
- [4] M. NAKAMURA, *Int. J. Jpn. S. Prec. Eng.* 57 (1991) 957-963.
- [5] Y. OKIYAMA, *Tool Engineer* 12 (1991) 75-80.
- [6] N.L. MORDECAI, T.C. LEE y J. HUDDLESTON, *Brit. Ceram. T.* 94 (1995) 21-24.
- [7] J.H. ZHANG, T.C. LEE y W.S. LAU, *J. Mater. Process. Tech.* 63 (1997) 908-912.
- [8] A. PITMAN y J. HUDDLESTON, *Brit. Ceram. T.* 99 (2000) 77-84.
- [9] B. CASAS, E. MARTÍNEZ, J. ESTEVE, M. ANGLADA y L. LLANES, *Rev. Metal. Madrid* 37 (2001) 140-144.
- [10] I. PUERTAS y C.J. LUIS, *Rev. Metal. Madrid* 38 (2002) 358-372.
- [11] I. PUERTAS y C.J. LUIS, *P. I. Mech. Eng. B-J. Eng.* 217 (2003) 791-803.
- [12] I. PUERTAS y C.J. LUIS, *J. Mater. Process. Technol.* 143-144 (2003) 521-526.
- [13] I. PUERTAS y C.J. LUIS, *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT'03)*, vol. II, Dublín, Irlanda, 2003, A.G. Olabi y M.S. J. Hashmi (Eds.), Dublin City University, Dublín, Irlanda, 2003, pp. 877-880.
- [14] S.H. LEE y X.P. LI, *J. Mater. Process. Technol.* 115 (2001) 344-358.
- [15] *EDM Technical Manual*, Poco Graphite, Inc., Decatur, Texas, USA, 1994.
- [16] UNE-EN-ISO 11562: 1998.
- [17] UNE-EN-ISO 4287: 1999.
- [18] D.C. MONTGOMERY, *Design and analysis of experiments*, Ed. John Wiley & Sons, 5ª Edición, Nueva York, 2001, pp. 218-286.
- [19] UNE-EN-ISO 13565-1: 1998. Parte 1.
- [20] I. CABANES, J.A. SÁNCHEZ, L.N. LÓPEZ DE LACALLE y A. LAMIKIZ, *IMHE* (2001) 63-72.
- [21] W. KÖNIG, D.F. DAUW, G. LEVY y U. PANTEN, *CIRP Annals* 37 (1988) 623-631.