

Revisión de las aplicaciones de la electroerosión por penetración al mecanizado de cerámicas conductoras^(*)

I. Puertas-Arbizu* y C.J. Luis-Pérez*

- Resumen** El término de materiales cerámicos técnicos o materiales cerámicos avanzados se aplica a una gama emergente de materiales, que tienen unas propiedades excelentes de dureza, resistencia al desgaste, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, en un amplio rango de temperatura. Sin embargo, los materiales con buenas prestaciones suelen ser difíciles de procesar y los materiales cerámicos no son la excepción. Aunque la mayor parte de los materiales cerámicos no son conductores, gracias a la utilización de determinados aditivos metálicos es posible hacer que lo sean y, por lo tanto, éstos pueden ser mecanizados por procesos de electroerosión. El presente trabajo es una revisión de las diferentes aplicaciones de los materiales cerámicos, haciéndose especial hincapié en los materiales cerámicos conductores, así como de los procesos de mecanizado que se pueden emplear en su fabricación, incidiendo fundamentalmente sobre el proceso de la electroerosión por penetración.
- Palabras clave** EDM. Mecanizado. Materiales cerámicos conductores. Procesos de fabricación. Acabado superficial. Integridad superficial.

A revision of the applications of the electrical discharge machining process to the manufacture of conductive ceramics

- Abstract** The term of technical ceramics or advanced ceramics is applied to a great emerging variety of materials, which have excellent properties such as hardness, wear resistance, corrosion resistance, mechanical strength, in a wide range of temperature, among others. Nevertheless, materials with high quality performance are also difficult to manufacture, and ceramic materials are not the exception. The majority of the ceramic materials are not conductive, but however, the use of new metallic pigments and compounds makes it feasible to become them conductive and, therefore, these ceramics can be machined by the EDM process. The present work is a review of the different applications of technical ceramics, concentrating on the conductive ceramics. Moreover, the machining processes that can be employed for their manufacturing are to be shown, focusing attention on the die sinking EDM process.
- Keywords** EDM. Machining. Conductive ceramics. Manufacturing processes. Surface finish. Surface integrity.

1. INTRODUCCIÓN

El término de “materiales cerámicos técnicos o avanzados” es un término relativamente reciente, que se aplica a una variada gama de materiales, generalmente obtenidos a partir de materias primas inorgánicas con un alto grado de pureza. Dichas materias primas son sometidas a procesos de conformado típicos de la tecnología de la pulvimetalurgia (tales como el prensado en seco, el prensado

isostático, el moldeo en pasta, la extrusión y el moldeo por inyección) y, posteriormente, a procesos de sinterización a elevada temperatura (de al menos 1.000 °C). Con ello es posible obtener materiales con elevada densidad que poseen, además, buenas prestaciones técnicas relativas a: dureza, resistencia mecánica, desgaste y corrosión a alta temperatura^[1].

Dentro del término de materiales cerámicos avanzados se engloban los materiales cerámicos

(*) Trabajo recibido el día 6 de marzo de 2002 y aceptado en su forma final el día 24 de julio de 2002.

(*) Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. ETSII e IT-Universidad Pública de Navarra. C/ Campus de Arrosadía s/n, 31006 Pamplona (España). Tfno: 34 948 169305. E-mail: inaki.puerta@unavarra.es

monolíticos, los materiales compuestos de matriz cerámica, los materiales vitrocerámicos y el vidrio. Estos tres últimos tipos de materiales cerámicos pueden reforzarse mediante el empleo de partículas, fibras, o *whiskers*. Por ello, existe una gran variedad de materiales cerámicos tales como el carburo de silicio (SiC), el carburo de boro (B₄C), el boruro de titanio (TiB₂), la alúmina (Al₂O₃) y la circonia (ZrO₂), entre otros, que tienen una gran aplicación tanto en el campo industrial como en el de la investigación^[1].

El presente trabajo es una revisión de las diferentes aplicaciones de los materiales cerámicos técnicos, así como de los procesos de mecanizado que se pueden emplear en su fabricación. Se ha incidido especialmente en una variedad de los anteriores que posee propiedades electroconductoras, bien sea de forma natural o mediante la adición de determinados compuestos. Además, se ha hecho un especial hincapié en el proceso de mecanizado por electroerosión, en su variante de penetración, de esta categoría de materiales cerámicos ya que presenta determinadas ventajas con respecto a otros procesos de fabricación, tanto convencionales como no convencionales. Entre las anteriores ventajas se pueden citar que dicho proceso de mecanizado es independiente de las propiedades de dureza de los materiales cerámicos, la obtención de buenos acabados superficiales así como la posibilidad de mecanizar piezas con geometrías complejas.

Una vez que los componentes cerámicos se han fabricado, éstos, en gran parte de los casos, no pueden ser sometidos a tratamientos térmicos para in-

troducir cambios intencionados en su estructura. Los materiales cerámicos están constituidos fundamentalmente por un sistema multifase, formado por cristales, una fase aglutinante y poros, siendo dicha estructura consecuencia directa de su proceso de fabricación^[2].

Los materiales cerámicos pueden pertenecer al grupo de los materiales cerámicos de tipo óxido, tales como: el óxido de aluminio (Al₂O₃), el óxido de circonio (ZrO₂) y del óxido de titanio (TiO₂), o a las de tipo no óxido, tales como: el nitruro de silicio (Si₃N₄) y el carburo de silicio (SiC). Dentro de los materiales cerámicos, cabe señalar también otro tercer grupo de materiales cerámicos de tipo silicato, que incluyen materiales como la cerámica de gres y la porcelana, pero que son de poca importancia en el campo de la ingeniería mecánica^[2].

Actualmente, existe una tendencia hacia la aplicación y desarrollo de los materiales cerámicos anteriores de tipo óxido y no óxido como consecuencia de sus propiedades físicas y mecánicas^[3 y 4]. En la tabla I se pueden observar algunas de las propiedades de los materiales cerámicos más importantes.

Entre las características y propiedades de estos materiales, que son particularmente útiles, cabe destacar: su elevado índice de dureza, la resistencia al desgaste y su elevada resistencia mecánica específica. Sin embargo, es el mantenimiento de dichas propiedades a elevadas temperaturas lo que presenta a los materiales cerámicos como la única solución potencial para un gran número de aplicaciones en el campo de la ingeniería^[5].

Tabla I. Propiedades mecánicas de materiales cerámicos técnicos

Table I. Mechanical properties of some technical ceramics

Material Cerámico	Densidad (g/cm ³)	Punto de Fusión (°C)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Dureza Vickers (MPa)
Alúmina (Al ₂ O ₃)	3,9	2.050	2.200-2.600	260-300	15.000-16.500
Carburo de Boro (B ₄ C)	2,51	2.450	2.855	155	37.000
Carburo de Silicio (SiC)	3,10	2.600	2.000-3.500	310	25.000-35.000
Carburo de Wolframio	15,63	2.870	6.300	1.440	15.500
Circonia estabilizada con Ytria (ZrO ₂ /Y ₂ O ₃)	5,9	2.680	2.000	300-600	12.500
Diamante Natural	3,51	3.500	8.960	>1.200	40.000-100.000
Mullita	2,8	1.880	550		9.000
Nitruro de Aluminio (AlN)	3,25	2.500	2.100	190	11.000
Nitruro de Silicio (Si ₃ N ₄ prensado en caliente)	3,11	1.900	2.000-3.500	400-580	6.000-22.000
Sialon (Si ₃ N ₄ , AlN y Al ₂ O ₃)	3,24		>3.500	400-450	16.500-18.000

Sin embargo, los materiales con buenas prestaciones a lo largo de su vida útil suelen ser difíciles de procesar y los materiales cerámicos no son la excepción. Así, el mayor obstáculo que presentan es el relativo a su fabricación mediante métodos de mecanizado con un coste rentable y que no disminuyan de forma significativa sus propiedades en la superficie procesada^[4-6].

Aunque la mayor parte de los materiales cerámicos no son conductoras, gracias a la utilización de determinados aditivos metálicos es posible hacer que lo sean y, por lo tanto, éstas pueden ser mecanizadas por procesos de electroerosión^[7].

Las características generales de los materiales cerámicos suelen ser fuertemente dependientes de su proceso específico de fabricación^[3]. Además, uno de los problemas más importantes a los que debe enfrentarse la tecnología de fabricación de los materiales cerámicos es la fiabilidad de sus componentes. En la búsqueda de la mejora de dicha fiabilidad, se han seguido varios enfoques entre los que se incluyen: los ensayos no destructivos, los ensayos de prueba, el desarrollo de materias primas de mayor pureza, la utilización de polvos de partida de tamaño único y submicrométrico y la mejora de las propiedades de tenacidad junto con el uso de materiales compuestos, reforzados bien sea con partículas o con fibras^[7-11].

Una de las técnicas investigadas para conseguir materiales cerámicos más tenaces y fiables ha sido la incorporación de fibras cerámicas en sus matrices. Las últimas investigaciones han llevado a la conclusión de que puede obtenerse una alta fiabilidad, sin comprometer las propiedades de resistencia mecánica, gracias a la utilización de *whiskers* cerámicos, en vez de las anteriores fibras, para reforzar la matriz cerámica^[8, 9 y 11].

2. APLICACIONES DE LOS MATERIALES CERÁMICOS

2.1. Aplicaciones que requieran resistencia al desgaste y a la corrosión

Los materiales cerámicos proporcionan la solución adecuada, incluso en las condiciones más desfavorables de trabajo, siendo la resistencia de éstas también eficaz en las aplicaciones en las que se da la combinación de fenómenos tales como el desgaste y la corrosión química. Las anteriores propiedades proporcionan a los materiales cerámicos una gran variedad de aplicaciones en el campo de la

biomecánica y la biomedicina, tales como las prótesis médicas y las dentales^[12-14].

Una aplicación muy interesante en el sector industrial es la de los rodamientos de bolas cerámicas de nitruro de silicio (Si_3N_4), tanto en su versión íntegra de material cerámico, para aplicaciones sin lubricación a alta temperatura, como en su versión híbrida con materiales metálicos, para aplicaciones a menor temperatura^[15].

En lo que respecta a la aplicación de los materiales cerámicos como herramientas de corte, cabe destacar el empleo de materiales cerámicos electroconductores como: la alúmina con carburo de titanio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), el diamante policristalino (PCD) y el nitruro de boro cúbico (CBN)^[2 y 16].

Una de las aplicaciones a la que se ha prestado mayor atención es la utilización de materiales cerámicos electroerosionables en la fabricación de matrices para procesos de extrusión de materiales metálicos, ya que los materiales cerámicos electroconductores ofrecen propiedades mecánicas y físicas superiores a las de los materiales empleados hasta la actualidad en dicho sector, tales como el IN-718, el AISI 4140 y las aleaciones de estelita^[9 y 17].

2.2. Aplicaciones que requieran resistencia mecánica a alta temperatura

La combinación de propiedades tales como: una gran dureza, una elevada resistencia a la flexión y a la compresión, un bajo coeficiente de dilatación térmico y un punto de fusión elevado, contribuye al gran empleo de los materiales cerámicos en aplicaciones mecánicas y estructurales a elevada temperatura. Por otro lado, el conjunto de las anteriores propiedades, junto con su gran resistencia a la corrosión, permiten también el uso de los materiales cerámicos en aplicaciones en las que se combinen condiciones de trabajo a alta temperatura con un ambiente químicamente agresivo^[18].

Los materiales cerámicos más utilizadas para este tipo de aplicaciones son: el nitruro de silicio, la mullita, la alúmina, la circonia, el carburo de silicio, el carburo de titanio (TiC) y el óxido de cromo (Cr_2O_3). Algunos ejemplos corrientes de este tipo de aplicaciones son: elementos metalúrgicos^[19], crisoles industriales y de laboratorio, quemadores, filtros para gases a alta temperatura y para metales líquidos, rotores y álabes de turbinas, matrices de extrusión en caliente y piezas mecánicas para aplicaciones a alta temperatura, entre otras^[2]. Con respecto a las aplicaciones de los

materiales cerámicos en las turbinas, cabe destacar el caso de las turbinas de gas^[20 y 21]. Además, son importantes las aplicaciones de los materiales cerámicos en intercambiadores de calor y en motores diesel adiabáticos^[22-25].

Además, las características específicas de este tipo de materiales los hace ideales para multitud de aplicaciones en el sector de la industria aeronáutica, como por ejemplo: formando parte del motor y la protección térmica de los transbordadores espaciales^[26].

2.3. Aplicaciones eléctricas, electrónicas y magnéticas

Cuando se necesitan propiedades de aislamiento eléctrico, con un elevado grado de fiabilidad, la alúmina de alta pureza es un material cerámico imprescindible en la fabricación de componentes eléctricos de alta tensión y de componentes electrónicos miniaturizados. Por otro lado, cuando se debe evitar la posible humectabilidad por parte de metales líquidos, se suele preferir el nitruro de silicio frente a la alúmina. En la fabricación de componentes tales como: los tiristores de potencia y los substratos electrónicos suele utilizarse el material cerámico de nitruro de aluminio (AlN) debido a que añade, además, una buena conductividad térmica.

Otra aplicación interesante es la referente a los materiales cerámicos piezoeléctricos^[27], siendo los más extendidos el titanato de bario (BaTiO₃), el titanato circonato de plomo (PZT), el metaniobiato de plomo, el titanato de bismuto (Bi₄Ti₃O₁₂), el niobiato de potasio y sodio y el titanato de plomo (PbTiO₃). El titanato de bario se ha ido substituyendo de manera progresiva por el titanato circonato de plomo, para el caso de las aplicaciones de transductores piezoeléctricos. Sin embargo, hoy en día es utilizado de una forma muy extendida en la industria de la fabricación de condensadores^[28].

Algunas de las aplicaciones más interesantes de este tipo de materiales cerámicos piezoeléctricos pueden encontrarse en sectores como: el de la industria militar (telefonía, comunicaciones bajo el agua, sónares y boyas emisoras), el de la automoción (sensores de impacto, filtros de radio, indicadores de la presión de los neumáticos, alarmas sonoras, apertura de puertas sin llave), el informático (microactuadores para el disco duro), el comercial (limpieza por ultrasonidos, soldadura por ultrasonidos, sensores de contacto por ultrasonidos, galgas extensométricas, indicadores de nivel, vibradores, taladrado por ultrasonidos, medidores de espesor,

detección de defectos, sistemas de alarma, detectores sísmicos, resonadores de televisión y de radio, sistemas de encendido, materiales inteligentes), el sector médico (imagen por ultrasonidos, caudalímetros, tratamientos con ultrasonidos, monitorización de pacientes, vaporizadores, eliminación de cataratas oculares) y en el del consumo (detectores de humo, humidificadores, limpieza de joyería, hornos de microondas, altavoces, instrumentos musicales, encendedores, teléfonos)^[1 y 27].

Entre los materiales cerámicos magnéticos permanentes, destacan los de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB) así como los basados en la Ferrita de Bario (BaFe). Los primeros pueden ser miniaturizadas hasta tener las dimensiones de 1 mm con detalles de micromecanizado en el orden de los micrómetros^[29]. Entre algunas de sus ventajas se pueden citar su elevado rendimiento y dureza, el alto valor de su potencia con respecto a su tamaño, su bajo nivel de ruido, su pequeño incremento de temperatura y su capacidad de respuesta dinámica, entre otras. Este tipo de materiales cerámicos magnéticos tiene su campo de aplicación en los motores de corriente continua sin escobillas, los motores paso a paso, los motores lineales de corriente continua, los motores síncronos de corriente continua, los separadores magnéticos, en el campo médico del diagnóstico por imagen, los microondas, los interruptores y relés, aparatos de sonido tales como teléfonos, micrófonos y altavoces, los actuadores, las unidades de disco de ordenadores, las cámaras de vídeo, los reproductores de CD, los vehículos solares, las turbinas de alta velocidad y los generadores de viento^[1 y 29].

2.4. Aplicaciones nucleares

Los materiales cerámicos encuentran numerosas aplicaciones en la tecnología de las instalaciones nucleares, ya que son capaces de mantener sus características originales sin apenas sufrir ningún fenómeno de envejecimiento, fatiga u oxidación química.

El carburo de boro puro (B₄C), sin ningún tipo de aditivo, es un material muy empleado como absorbente de neutrones, en reactores nucleares, debido a la presencia del isótopo del boro, B10^[30]. Una reciente aplicación de este material consiste en el desarrollo de un detector de medición del caudal de petróleo extraído por perforación con sondeo del fondo marino^[31 y 32].

Por otro lado, el carburo de silicio tiene aplicaciones como material de revestimiento del

combustible nuclear en los reactores refrigerados por gas^[33]. Los compuestos cerámicos tipo SiC-SiC se utilizan como materiales estructurales en los reactores de fusión debido a su buen comportamiento frente a la radiación, su resistencia a alta temperatura junto con sus mejores propiedades de tenacidad a la fractura frente al anterior material cerámico monolítico^[34 y 35].

Algunos otros materiales cerámicos, que suelen usarse como material aislante en los reactores nucleares son: la alúmina, la magnesia (MgO), la berilia (BeO) y la espinela (MgAl₂O₄). Estos materiales cerámicos pueden presentar problemas de degradación de tipo permanente o transitoria de sus propiedades, tales como la degradación de sus propiedades eléctricas y estructurales cuando son irradiados bajo la acción de un campo eléctrico^[36 y 37].

2.5. Aplicaciones nanotecnológicas

Los materiales cerámicos se usan también en la fabricación de dispositivos de tipo electromecánico y de tamaño micrométrico, es decir, los denominados como MEMS (*Micro Electro-Mechanical Devices*). En la actualidad, se fabrican complicados MEMS con partes móviles gracias a las tecnologías de la litografía multicapa, del mecanizado químico selectivo, la microfundición y la fotopolimerización^[38].

Entre las diversas aplicaciones de esta novedosa tecnología cabe señalar la fabricación de sensores, actuadores y sistemas más complejos, tales como las turbinas de gas realizadas a escala micrométrica, para la generación de potencia a alta temperatura^[39]. Tales turbinas se denominan nanoturbinas, ya que solamente son capaces de generar unos pocos vatios de potencia.

3. MECANIZADO DE MATERIALES CERÁMICOS

Inicialmente, debido a que los materiales cerámicos tienen una elevada dureza y baja tenacidad, era común que su fabricación se llevara a cabo mediante procesos de sinterización. Sin embargo, dichos procesos de fabricación no permiten obtener, en gran parte de los casos, la precisión dimensional requerida. Por ello, es necesario recurrir a posteriores procesos de acabado^[40 y 41]. Por otra parte, las aplicaciones de los materiales cerámicos han ido creciendo a lo largo de las dos últimas décadas, haciendo despertar un gran interés en la industria y logrando que los potenciales métodos de mecanizado adquieran gran importancia^[6 y 30].

Los procesos más comúnmente empleados en el mecanizado de materiales cerámicos avanzados pueden considerarse, según Tuersley *et al*^[5], dentro de dos categorías principales: procesos de partícula abrasiva y procesos térmicos.

Dentro del primer grupo se pueden englobar los procesos de rectificado, los procesos de mecanizado por ultrasonidos y los procesos con chorro de agua abrasivo. Se caracterizan porque, en cada caso, la erosión de la superficie se lleva a cabo mediante el arranque de material como consecuencia del impacto de una partícula abrasiva^[42].

Dentro del segundo grupo cabe señalar el proceso de mecanizado por láser, junto con el mecanizado electroquímico y el mecanizado por electroerosión. Este grupo se caracteriza porque el fundamento físico consiste en la fusión o vaporización de la superficie de la muestra y la posterior eliminación del material bien sea en su estado líquido o en su estado gaseoso.

Los principales problemas del proceso de rectificado son la falta de experiencia con el utillaje abrasivo, la insuficiente rigidez de la máquina-herramienta para el mecanizado de materiales cerámicos de alta resistencia, la formación de grietas indetectables debajo de la superficie, que pueden dar lugar a una resistencia mecánica pequeña, y la no existencia de una técnica rápida, y no destructiva, que permita determinar la naturaleza de los defectos que limitan la resistencia y que son introducidos por el proceso de rectificado^[43 y 44].

Hay varias opciones para impedir y reparar el daño anterior. En lo que respecta a esta última categoría, se pueden citar procesos tales como el lapidado, el pulido y la implantación iónica^[30]. Sin embargo, dichos tratamientos no son completamente efectivos y, además, representan un alto coste en algunos casos. Por consiguiente, la otra alternativa es evitar la generación del daño durante la operación de mecanizado^[5].

Entre estas últimas alternativas se encuentra el método de rectificado en régimen dúctil y el rectificado por *creep-feed*^[5]. Este último tipo de rectificado consiste en aumentar la profundidad de pasada a la vez que se disminuye la velocidad de avance, de manera que se consigue un menor desgaste de la muela, una mejora en la calidad superficial y un aumento en la resistencia del material mecanizado. Sin embargo, da lugar a fuerzas normales de hasta ocho veces las que se producen en el rectificado convencional^[30 y 45].

Otros aspectos también muy importantes a resolver, en el rectificado de materiales cerámicos,

son los relativos al reafilado de la muela^[46], los problemas medioambientales que conllevan la eliminación de los residuos procedentes del proceso tales como la viruta y los fluidos usados, además de los vapores generados, que constituyen un riesgo para la salud del operario^[44]. Así, parece evidente, según König *et al.*^[45], que los procesos de rectificado convencionales, que utilizan velocidades de corte y profundidades de pasada pequeñas junto con velocidades de avance elevadas, no son adecuados para el mecanizado de materiales cerámicos.

Es posible usar también para el mecanizado de materiales cerámicos el proceso de mecanizado por ultrasonidos, ya que permite la obtención de detalles con una precisión elevada y un buen acabado sin tener en cuenta la dureza o la naturaleza conductora del material^[47]. Un campo donde los ultrasonidos pueden tener una aplicación ventajosa es como complemento de otros procesos de mecanizado convencionales, tales como el rectificado y el torneado, o no convencionales, tales como la electroerosión^[5 y 43].

El chorro de agua abrasivo es otro proceso de mecanizado que puede emplearse en el mecanizado de materiales cerámicos. Los parámetros que más influyen en este proceso son la presión del chorro de agua (hasta 400 MPa), la distancia de trabajo (*stand-off*), el tipo de abrasivo usado (granate, alúmina, carburo de silicio y carburo de boro), su tamaño y su velocidad de flujo, el material y la geometría de la boquilla y la porosidad del material cerámico^[42].

Sin embargo, el mecanizado por chorro de agua abrasivo posee varios inconvenientes, según se recoge en los trabajos de Komanduri^[47], tales como: la presencia de niveles de ruido elevados (de 80 a 100 dB), la necesidad de un sistema recogedor a la salida del chorro, la seguridad, la incapacidad de mecanizar agujeros no pasantes, la posibilidad de averías debido al abrasivo o a la alta presión del agua y las limitaciones relacionadas con la precisión dimensional, la velocidad de trabajo y el acabado superficial.

El mecanizado de materiales cerámicos con láser de CO₂ ha demostrado ser, desde el punto de vista económico, una alternativa viable para la fabricación de componentes cerámicos de aplicación industrial. Esto ha sido posible principalmente debido a la aplicación de la programación con control numérico a esta tecnología^[9 y 48].

El uso del láser para el mecanizado de los materiales cerámicos presenta una serie de ventajas en-

tre las que se encuentran la ausencia de contacto con la pieza, la naturaleza no abrasiva del proceso, una reducción de las limitaciones de la mecanización de formas y la producción de una menor cantidad de daño superficial. Existen, sin embargo, una serie de desventajas entre las que destacan la posibilidad de que la acción de vaporización del material pueda producir daños superficiales debido a su intensidad^[5 y 48], la disminución del valor de la resistencia a la flexión^[43] y la aparición de una zona afectada por el calor, con cambios incluso en la microestructura del material que pueden dar lugar a una disminución de la resistencia a fatiga del mismo^[5 y 47].

Los parámetros de proceso más importantes son las propiedades térmicas de la pieza, la manera en la que es suministrado el calor (pulsos o continua) y la eficiencia con la que el material fundido o vaporizado se elimina del camino de corte^[42 y 49]. Existen gran cantidad de estudios acerca de los problemas de mecanizabilidad y la optimización de los parámetros de trabajo en materiales cerámicos tales como el nitruro de silicio, el carburo de silicio y la circonia^[5, 30 y 50].

La fabricación de nuevos materiales compuestos cerámicos electroerosionables, gracias al desarrollo de una serie de innovadores compuestos y pigmentos electroconductores^[51], da lugar a una opción de fabricación que hasta el momento no era posible^[8, 9 y 11]. Estos nuevos compuestos cerámicos están constituidos por una base cerámica no conductora tal como la alúmina, el nitruro de silicio o la circonia, entre otras, a la que se añade una serie de compuestos cerámicos que son electroconductores como el carburo de titanio (TiC), el boruro de titanio (TiB₂), el boruro de circonio (ZrB₂) y el nitruro de titanio (TiN), que proporcionan, al compuesto resultante, una resistividad de menos de 10 Ω·cm. Para poder contrarrestar la disminución de la tenacidad y la resistencia mecánica del nuevo compuesto, se añaden *whiskers* de SiC en cantidad suficiente para compensar el anterior efecto. Esto produce una mejora en la tenacidad a la fractura, de dos a tres veces, con respecto al material cerámico inicial. Además, la resistencia mecánica y la dureza del compuesto final también se ven mejorados^[9-11]. El tamaño de las partículas, así como el porcentaje a añadir, puede ajustarse para hacer al material cerámico lo suficientemente electroconductor, de forma que se pueda llevar a cabo el proceso de la electroerosión, sin comprometer de manera significativa las propiedades y requerimientos del material cerámico^[7 y 47].

Algunos materiales cerámicos, tales como el carburo de boro (B_4C) y el boruro de titanio (TiB_2), presentan una buena conductividad eléctrica debido a los electrones libres de red, que transportan la carga eléctrica de forma similar al caso de los materiales metálicos. Dichos materiales cerámicos se suelen denominar como materiales cerámicos conductores intrínsecos.

Se pueden conseguir también unas propiedades electroconductoras adecuadas para los materiales cerámicos mediante otros mecanismos tales como la liberación de electrones adicionales, por ejemplo en el óxido de titanio (TiO_2), o la adición de impurezas en forma de átomos de menor valencia, como en el caso del óxido de circonio (ZrO_2) dopado con óxido de calcio (CaO)^[2], aunque en este caso la conducción es iónica.

Normalmente, el proceso de la electroerosión por penetración no está influenciado por la dureza del material, pero requiere de una resistividad eléctrica de menos de $100 \Omega \cdot cm$ ^[5, 52, y 53]. Por otro lado, existen también algunos otros autores que afirman que la resistividad eléctrica de los materiales cerámicos electroerosionables debe ser menor de $300 \Omega \cdot cm$ ^[42]. A este respecto, cabe señalarse que no es posible hacer una afirmación con carácter general, debiendo verificarse para cada caso en concreto. En la tabla II se pueden observar los valores y órdenes de magnitud aproximados de la resistividad eléctrica de algunos materiales cerámicos técnicos.

Uno de los aspectos del proceso con mayor efecto sobre la velocidad de mecanizado y la energía de la chispa es la elección de la fuente de potencia.

Tabla II. Valores de resistividad eléctrica de materiales cerámicos técnicos

Table II. Electrical resistivity values of some technical ceramics

Material Cerámico	Resistividad eléctrica ($\Omega \cdot cm$)
Alúmina (Al_2O_3)	$>10^{14}$
Carburo de Boro (B_4C)	0,1-10
Carburo de Silicio (SiC)	10^2-10^6
Carburo de Wolframio	$2 \cdot 10^{-4}$
Circonia estabilizada con Ytria (ZrO_2/Y_2O_3)	$>10^{10}$
Diamante Natural	$>10^2$
Mullita	$>10^{16}$
Nitruro de Aluminio (AlN)	$>10^{14}$
Sialon (Si_3N_4 , AlN y Al_2O_3)	$10^{12}-10^{17}$

Dentro de los diferentes tipos existentes, son los generadores de resistencia y capacidad (R-C) los que actualmente tienen más aceptación por ser los más adecuados para llevar a cabo las aplicaciones de mecanizado de materiales cerámicos^[5].

Entre las ventajas de la electroerosión cabe señalar: su capacidad para mecanizar formas complicadas, la no existencia de esfuerzos mecánicos sobre la pieza y su tasa de eliminación de material relativamente elevada. Por el contrario, la desventaja más importante es que está limitada al campo de los materiales conductores^[5], siendo la posible falta de uniformidad de la conductividad eléctrica, a través de toda la pieza, uno de los problemas más importantes dentro de la electroerosión de los materiales cerámicos conductores, ya que se pueden llegar a producir situaciones de interrupción del mecanizado o incluso de choque entre el electrodo y la pieza^[2].

Por lo tanto, la combinación del mecanizado por electroerosión y los nuevos y más tenaces materiales cerámicos ofrece la posibilidad de vencer las limitaciones del pasado y abre grandes expectativas de futuro en el campo de la fabricación de componentes cerámicos^[9].

Además, en los trabajos de Mohri *et al.*^[54] se recoge un nuevo método para mecanizar materiales cerámicos aislantes mediante la electroerosión. Tal método consiste en la utilización de una placa o malla metálica como electrodo auxiliar de ayuda que se coloca sobre la superficie del material cerámico aislante. Entre los ejemplos de materiales cerámicos aislantes electroerosionados, con este método, se encuentran, además de las de tipo sialon, el nitruro de silicio (Si_3N_4), el carburo de silicio (SiC), la circonia (ZrO_2) y la alúmina (Al_2O_3), entre otros.

4. COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES CERÁMICOS ELECTROCONDUCTORES FRENTE A LA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

4.1. Introducción

Gracias a los avances experimentados en el campo de la electrónica y los sistemas de control^[55 y 56], el proceso de mecanizado por electroerosión ha sido objeto de amplio estudio por parte de los investigadores, principalmente en el campo de los aceros y de otros materiales metálicos, tales como los materiales compuestos de matriz metálica, también denominados MMCs, o los bien conocidos como

metales duros, que son carburos cementados de matriz metálica^[17 y 57-62]. Pero, es en estos últimos años cuando ha surgido un nuevo campo de investigación dentro de la electroerosión, que trata de aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de estos últimos 50 años, al mecanizado de los materiales cerámicos y de los materiales compuestos cerámicos, debido a sus excepcionales propiedades y a sus posibles aplicaciones industriales en la actualidad^[63-66]. Dicho campo de investigación, de la electroerosión de materiales cerámicos conductores, adolece ciertamente de trabajos de investigación y de estudios en profundidad. En la figura 1 se muestra una máquina de electroerosión por penetración.

De Maidagan *et al.*^[67] afirman que cuando los fabricantes de componentes cerámicos sean conscientes de las posibilidades que la tecnología de la electroerosión aporta como método de mecanizado, quizá se esté al comienzo de un nuevo hito dentro de la historia de la electroerosión.

Se ha encontrado que algunos de los parámetros de proceso en la electroerosión de materiales cerámicos conductores se comportan de forma diferente que para el caso de los tradicionales materiales metálicos^[3, 63 y 64]. Además, uno de los condicionantes más importantes a la hora de que un material cerámico pueda ser electroerosionado es que la resistividad eléctrica del mismo sea inferior a $100 \Omega \cdot \text{cm}$ ^[3, 32 y 68].

Por otra parte, en el caso de los materiales cerámicos, la chispa generada entre el electrodo y la pieza es similar al caso de los metales, con la única diferencia de que los puntos conductores en el material cerámico están dispersos o aislados sobre la superficie, mientras que en el otro caso están distribuidos de manera uniforme.

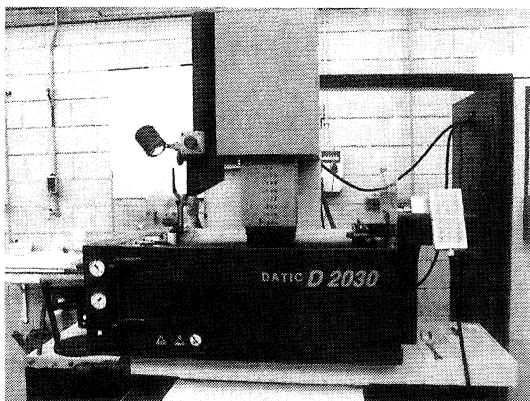


Figura 1. Máquina de electroerosión por penetración.

Figure 1. Die sinking EDM machine.

Rev. Metal. Madrid 38 (2002) 358-372

4.2. Mecanismos de eliminación de material

En general, los mecanismos de eliminación o de arranque del material cerámico conductor mediante el proceso de mecanizado por electroerosión pueden ser de dos tipos^[3 y 69]:

- 1) Para duraciones del pulso menores de $1 \mu\text{s}$, la eliminación del material se lleva a cabo principalmente por la acción de las fuerzas electrostática y electromagnética.
- 2) Para duraciones de pulso mayores de $1 \mu\text{s}$, los principales mecanismos responsables son la fusión, evaporación y la termofractura (*thermal spalling*) que, a su vez, son inducidos por el calor producido debido al plasma entre el electrodo y la pieza. La termofractura se define como el fallo mecánico del material debido a la aparición de esfuerzos internos que superan la resistencia del mismo. Esto ocurre cuando el material se dilata o se contrae durante un cambio brusco de temperatura, dando lugar a esfuerzos de tracción y de compresión que pueden producir el fallo por tracción o por cortadura, respectivamente^[70]. Los materiales cerámicos con unas propiedades de dureza y fragilidad muy elevadas, unido a una baja conductividad tanto eléctrica como térmica, tienden a producir la formación de marcados gradientes de temperatura fuera de la zona de fusión y vaporización, y al final conducen a una termofractura del material cerámico^[3 y 70]. Dicho mecanismo de eliminación normalmente ocurre a un nivel más profundo que la zona anterior y, por lo tanto, produce un peor acabado superficial. En la figura 2 puede apreciarse la micrografía de una zona



Figura 2. Micrografía, obtenida por Trueman *et al.*^[69], de una zona de material cerámico eliminada mediante termofractura.

Figure 2. Spalled area micrograph on ceramic material obtained by Trueman *et al.*^[69].

del material que ha sido eliminada mediante el mecanismo de la termofractura.

A este respecto, cabe destacar las investigaciones que se recogen en los trabajos de Trueman *et al.*^[69], en los que se establece que si la liberación de calor durante el proceso de electroerosión es lo suficientemente intenso, se puede inducir un proceso de termofractura a gran escala, que da lugar a un régimen de mecanizado de los materiales cerámicos más rápido y eficiente. Los compuestos cerámicos con dispersiones de partículas en su matriz, tales como el SiC + TiB₂ y el sialon + TiN, son los candidatos ideales para la utilización de esta técnica de eliminación de material a través del proceso de termofractura controlada. En la figura 3 puede apreciarse el agrietamiento producido debido a las anteriores condiciones de mecanizado.

Para el caso del material cerámico de Carburo de Silicio infiltrado con Silicio ó SiSiC (granos de carburo de silicio en matriz de silicio), su mecanismo de eliminación difiere del de los materiales metálicos, ya que la electroerosión de la misma produce una superficie porosa en la que la fase de aglutinante ha sido eliminada y los granos de SiC permanecen expuestos^[2]. Este fenómeno se debe a que la matriz de silicio posee una conductividad eléctrica superior a la de los granos de SiC.

En el caso del material cerámico de carburo de boro (B₄C), el material que ha sido fundido no se expulsa al medio dieléctrico sino que recupera su rigidez sobre la superficie de la pieza^[30]. Este hecho es debido a las elevadas temperaturas de ebullición y de fusión del carburo de boro, de 3.500 °C y 2.450 °C respectivamente, así como a la gran viscosidad que presenta la masa fundida. La separación del material se produce debido fundamen-

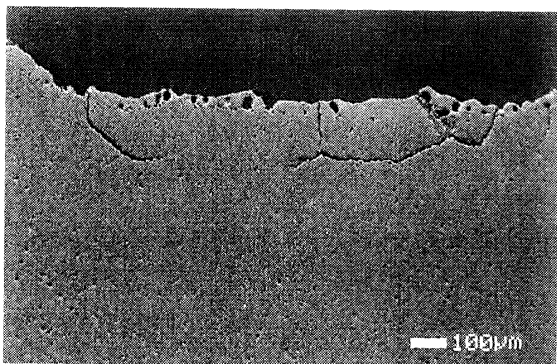


Figura 3. Agrietamiento debajo de la superficie, debido al mecanizado bajo condiciones de arco eléctrico, llevado a cabo por Trueman *et al.*^[69].

Figure 3. Sub-surface cracks after machining under arcing conditions obtained by Trueman *et al.*^[69].

talmente a la mala adherencia y a las tensiones de tracción en la superficie.

Los materiales cerámicos con una buena resistencia al choque térmico, tales como el nitruro de silicio, el sialon, o la alúmina con carburo de titanio (Al₂O₃ + TiC) presentan un mecanismo de eliminación de material similar al de los materiales metálicos.

4.3. Problemas asociados al proceso de electroerosión de materiales cerámicos

La electroerosión de materiales cerámicos puede dar lugar a una capa superficial con defectos del tipo de esfuerzos residuales desfavorables, grietas y cráteres. Por lo tanto, un mal acabado superficial puede conducir a una disminución en la resistencia a la fractura. Además, una cantidad variable de defectos superficiales produce un valor bajo del módulo de Weibull. Para los materiales cerámicos, los valores típicos del módulo de Weibull suelen oscilar entre 5 y 20^[71].

Deng *et al.*^[40] y Lee *et al.*^[41] afirman que es necesario mejorar la integridad superficial de los materiales cerámicos electroerosionados antes de que puedan ser usados en aplicaciones prácticas. En sus investigaciones, Deng *et al.*^[40] determinaron la mejora en la integridad superficial de los materiales cerámicos Al₂O₃ + TiC y Si₃N₄ + TiC tras haberlos sometido a dos tratamientos mecánicos de acabado superficial como el mecanizado por ultrasonidos y el chorro de abrasivo con aire a presión. Los dos tratamientos superficiales mecánicos anteriores resultaron ser eficaces a la hora de eliminar la capa superficial dañada, mejorando la integridad superficial de las muestras, su rugosidad superficial y su dureza, así como resultando en un incremento de la resistencia mecánica y del módulo de Weibull de las mismas. En las figuras 4 y 5 se pueden observar las micrográficas superficiales obtenidas en los trabajos de Lee *et al.*^[41], tras haber sometido el material cerámico de Al₂O₃ + TiC a los anteriores tratamientos de acabado superficial por ultrasonidos y chorro de abrasivo, respectivamente.

A partir de las investigaciones de Dauw *et al.*^[72], se deducía que las teorías e hipótesis que se aplican a los metales no podían ser confirmadas con generalidad a la electroerosión de materiales cerámicos conductores. Lo anterior significaba que las tasas de eliminación de material y la rugosidad de las superficies electroerosionadas no eran solamente dependientes de los parámetros de mecanizado físicos, tal y como se definían en los modelos

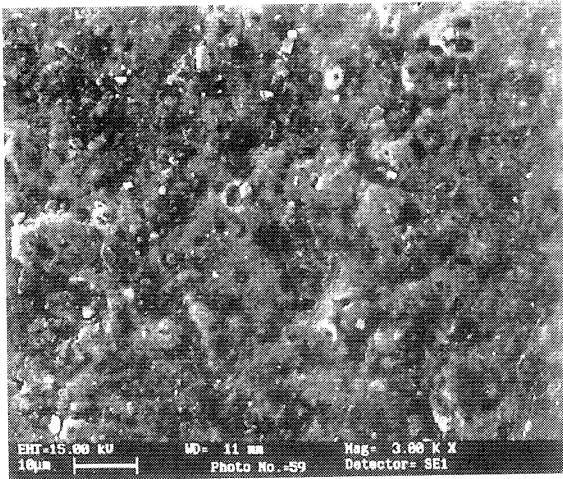


Figura 4. Micrografía electrónica de barrido de la superficie electroerosionada del material cerámico Al₂O₃ + TiC tras haber sido sometido a un proceso de acabado de mecanizado con ultrasonidos (según se recoge en los trabajos de Lee *et al.*^[41]).

Figure 4. SEM micrograph of the EDMed surface of the Al₂O₃ + TiC ceramic when subjected to surface modification by ultrasonic machining (obtained by Lee *et al.*^[41]).

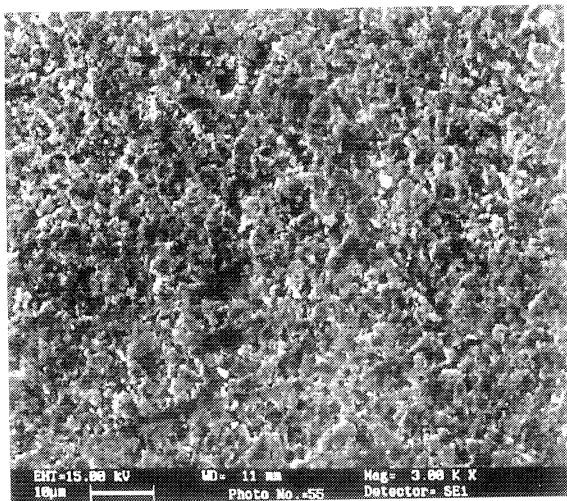


Figura 5. Micrografía electrónica de barrido de la superficie electroerosionada del material cerámico Al₂O₃ + TiC tras haber sido sometido a un proceso de acabado con chorro de abrasivo (según se recoge en los trabajos de Lee *et al.*^[41]).

Figure 5. SEM micrograph of the EDMed surface of the Al₂O₃ + TiC ceramic when subjected to surface modification by abrasive blasting (obtained by Lee *et al.*^[41]).

físico-matemáticos, sino que también dependían del tipo de material. Además, era posible asociar características perceptibles en las imágenes de microscopía con parámetros derivados del análisis fractal y convencional de los datos obtenidos de la perfilometría. Por otro lado, el análisis fractal se

traducía en parámetros que parecían contener información, acerca del perfil, diferente que la de los parámetros convencionales.

De forma similar al caso de los metales, en la electroerosión de los materiales cerámicos también puede darse el fenómeno de crecimiento de borde (*build up edge*). En determinadas condiciones, energías de pulso y tiempos de descarga elevados así como tiempos de pausa insuficientes, parte de material cerámico comienza a adherirse sobre la superficie del electrodo, dando lugar a un filo re-crecido mientras que sobre la superficie de la pieza se forma un cráter. Debido a la similitud entre ambos fenómenos, suele emplearse el término EDBU^[3]. La formación de tal fenómeno puede eliminarse si se utiliza una mayor presión del fluido dieléctrico. En general, en la electroerosión de materiales cerámicos, sólo proporcionan resultados satisfactorios los electrodos de cobre con polaridad negativa^[3].

4.4. Estudios llevados a cabo sobre distintos materiales cerámicos

Zhang *et al.*^[70] usaron en sus investigaciones un material cerámico de óxido de aluminio con carburo de titanio y carburo de wolframio (Al₂O₃ + TiC + WC), obtenida por prensado en caliente. Los resultados experimentales mostraron que la tasa de eliminación aumentaba cuando se aumentaba tanto el tiempo de impulso (de 10 a 1.800 µs) como el valor de pico de la corriente de descarga (de 4 a 24,8 A). Sin embargo, éste variaba muy poco, bajo condiciones normales de la tensión (de 100 a 180 V) y del tiempo de pausa (de 100 a 3.200 µs).

En cuanto a la rugosidad superficial, ésta aumentaba también al aumentar la energía de descarga del pulso y variaba muy poco, bajo condiciones normales de tensión y tiempo de pausa. En lo que respecta a los espesores de la capa resolidificada y de la capa afectada térmicamente, cuando se incrementaba el valor de pico de la corriente de descarga no se apreciaban grandes cambios.

En los trabajos de Pitman *et al.*^[53] se lleva a cabo un estudio sobre las características de electroerosión de un material cerámico constituido por una base de circonia con partículas dispersas electroconductoras de nitrato de titanio (ZrO₂ + TiN). Se evaluaron diversas características tecnológicas tales como la tasa de eliminación de material, el desgaste del electrodo y el consumo de potencia específico, tanto en condiciones normales

de chispa como en condiciones de arco eléctrico. Los valores que se obtuvieron, ilustraron que en muchos casos la situación de arco eléctrico representaba un gran incremento en la rentabilidad de la capacidad de eliminación de material de cada descarga. Con respecto al mecanismo de eliminación del material, para las situaciones de mecanizado con arco eléctrico, Pitman *et al.*^[53] proponen que la mejora de dicho rendimiento es debido a la termofractura de partículas de gran tamaño en forma de copa.

König *et al.*^[2] obtuvieron resultados interesantes a partir de tres materiales cerámicos conductores, dos tipos de SiSiC y Syalon S-501. Los valores de desgaste relativo del electrodo obtenidos fueron de menos del 12 % para las condiciones de ensayo utilizadas (electrodo de cobre con polaridad positiva, valor de la corriente de descarga de 16 A y unos tiempos de impulso y de pausa de 100 μ s). Observaron que al disminuir el tiempo de duración de los pulsos (de 100 a 25 μ s y para una corriente de descarga de 24 A) el desgaste del electrodo se incrementaba de forma substancial. Otro resultado interesante era la variación en los resultados que ocurría cuando se electroerosionaban los dos tipos de SiSiC con composiciones químicas idénticas.

De Maidagan *et al.*^[67] estudiaron el comportamiento del material cerámico de carburo de silicio infiltrado con silicio (SiSiC) frente a la electroerosión por penetración. Según se recoge en este estudio, los materiales más apropiados para la fabricación de los electrodos son el cobre y la aleación de wolframio y cobre. Para conseguir la mayor tasa de eliminación posible se utilizó un intervalo de pulso variable, lo que dio lugar a que los mayores valores tuvieran lugar en un intervalo del tiempo de impulso de 100 a 800 μ s, siendo el valor máximo algo menor de 7 mm³/min. Además, la tasa de eliminación de material se pudo incrementar hasta 25 mm³/min mediante la utilización de un dieléctrico compuesto por una mezcla de glicerina y agua. Sin embargo, también se constató la presencia de daños importantes en el material cerámico. En lo que respecta a la rugosidad superficial, ésta aumentaba con la duración del tiempo de impulso, para el caso de la utilización de polaridades positivas para el electrodo de cobre.

Noble *et al.*^[33] realizaron un estudio acerca del material cerámico de carburo de silicio (SiC) comercializado con el nombre de Refel SiC. Según se recoge en sus observaciones, se vio que la relación de eficiencia que proporcionaba la tasa de eliminación de material óptima era la del 50 %. Además,

la tasa de eliminación aumentaba con el tiempo de impulso, alcanzando un valor máximo de 3,6 mm³/min, para un tiempo de impulso de 1 ms. Para las condiciones de ensayo, cuando se usaba el electrodo de grafito la tasa de eliminación de material era ligeramente inferior. Por otro lado, dicho material de electrodo presentaba un comportamiento al desgaste ligeramente mejor al del caso del cobre. En lo que respecta al acabado superficial de las muestras de SiC, se observó que éste empeoraba con la duración del pulso.

Noble *et al.*^[33] también afirman que los esfuerzos para mejorar las condiciones de limpieza del *gap* no tienen tanta influencia sobre el mecanizado, en el caso de materiales como el SiC, debido a su baja tasa de eliminación de material y a su pequeño tamaño de partícula.

Ramulu *et al.*^[73] estudiaron la caracterización superficial del material compuesto de matriz cerámica de carburo de silicio con partículas de boruro de titanio (SiC + TiB₂), tras ser sometido a un proceso de electroerosión por penetración. Además, se emplearon en el estudio electrodos de cobre, latón y grafito. A partir del estudio de las distribuciones de probabilidad de las alturas de los perfiles de rugosidad, concluyeron que el electrodo de latón era el que producía la menor variación en lo que respecta a dicha altura del perfil. Además, a través del estudio de la curva de tasa de material del perfil de rugosidad, también llegaron a la conclusión de que el tipo o la naturaleza de la superficie producida no era función de las condiciones de mecanizado o del material del electrodo empleados, ya que la forma de dicha curva era similar para todos los casos.

Por consiguiente, basándose en los resultados experimentales obtenidos en su estudio, Ramulu *et al.*^[73] determinaron que el uso de electrodos de cobre era el más adecuado para el mecanizado del material cerámico SiC + TiB₂, a la hora de obtener las mejores características superficiales en términos de la menor rugosidad superficial y el menor espesor de la capa refundida, y el mayor valor de dureza superficial.

Para el caso del material cerámico de carburo de boro (B₄C), según se afirma en Cabanes *et al.*^[30], la utilización de polaridad negativa durante el proceso de la electroerosión produce inestabilidades importantes en el proceso, que dañan de forma considerable tanto al electrodo como al material cerámico. Además, se observa que la máxima tasa de eliminación del material (8,5 mm³/min) se obtiene con la utilización de electrodos de cobre,

frente a los de grafito, y para unos valores de la intensidad bajos. El peor comportamiento del grafito, tanto en términos de la tasa de eliminación como del desgaste del electrodo, puede explicarse por ser material compactado, con menor densidad que el cobre^[68]. Este hecho hace que se desprendan granos de grafito que interfieren de forma negativa en el proceso. Cuando se utilizan valores altos de la intensidad, el proceso se vuelve muy inestable, dando lugar a situaciones de cortocircuito, a unas tasas de eliminación de material mucho más bajas (menores que el 10 % de la anterior), a un desgaste alto e irregular del electrodo, produciéndose, así mismo, el descascarillamiento de la superficie del material cerámico. También se aprecia que los valores de la rugosidad superficial, obtenidos cuando no se usan condensadores en paralelo entre el electrodo y la pieza, son inferiores a los obtenidos cuando sí se usan. La mejora se estima en torno al 50 % pero se aumentan en gran medida los tiempos de mecanizado^[66].

En un intento de responder a la necesidad urgente de desarrollo y empleo de materiales alternativos, que combinen las ventajas que poseen las superficies de los materiales cerámicos pero a un coste mucho menor, es importante la utilización de los recubrimientos superficiales de proyección térmica por *plasma spray*. Este tipo de recubrimientos se usa para aumentar la vida útil de los componentes sometidos a esfuerzos mecánicos elevados, además de para utilizar materiales base más baratos^[74 y 75].

Es importante, por lo tanto, la aportación de los trabajos de Mamalis *et al.*^[76] acerca de la electroerosión de los recubrimientos de carburo de wolframio y cobalto (WC-Co) por plasma spray sobre un sustrato de acero de alta resistencia y baja aleación. Según se recoge en sus trabajos, Mamalis *et al.*^[76] utilizaron cobre electrolítico como material para sus electrodos, empleando una polaridad negativa ya que ésta ofrecía un mejor acabado superficial y una tasa de eliminación de material mayor. Además, no observaron en ninguna de las muestras la capa blanca formada a partir de material fundido y resolidificado, típica en el caso de los metales.

Una variante del proceso anterior es la que se utiliza en las investigaciones de Thoe *et al.*^[75], en las que se realiza una combinación de los procesos de la electroerosión y el mecanizado con ultrasonidos para llevar a cabo el taladrado de agujeros de menos de 1 mm de diámetro sobre un sustrato de una aleación de níquel con un recubrimiento cerá-

mico de alúmina (Al_2O_3). Thoe *et al.*^[75] emplearon un equipo que usaba una primera fase de operación con mecanizado por ultrasonidos, para penetrar el recubrimiento cerámico de alúmina, y una segunda fase de operación, con mecanizado por electroerosión, que podía estar o no asistido con ultrasonidos, para penetrar en el sustrato metálico de la aleación de níquel.

5. VENTAJAS DE LA ELECTROEROSIÓN CON RESPECTO A OTROS PROCESOS

En el mecanizado de los materiales conductores cerámicos, el proceso de mecanizado mediante la electroerosión por penetración, según afirman Kennedy *et al.*^[43], ofrece una serie de ventajas frente a otros procesos de mecanizado, convencionales y no convencionales, tales como:

- El proceso de mecanizado de los materiales cerámicos es independiente de su dureza (la única limitación que existe es que su resistividad eléctrica sea inferior a $100 \Omega \cdot cm$).
- Unas tasas de eliminación de material elevadas.
- Fabricación relativamente fácil de utillaje (en el caso de los electrodos).
- La posibilidad de mecanizar piezas con geometrías complejas.
- Obtención de buenos acabados superficiales.
- Como el grafito se emplea en una parte de las aplicaciones de la electroerosión por penetración, sus ventajas a la hora de su mecanización permiten una fácil reproducción de los detalles más complicados de la pieza.
- La posterior reutilización de los electrodos da lugar a bajos costes.
- La complejidad de la geometría del electrodo es un factor que tiene poca relevancia sobre la eficiencia o rendimiento del proceso.

Cabanes *et al.*^[30] señalan que la ventaja más importante del proceso de electroerosión, además de su capacidad para reproducir geometrías muy complejas, y más concretamente en lo que respecta a los materiales cerámicos, consiste en que dicho proceso es independiente de la dureza y de la resistencia del material a mecanizar en particular. A esto debe añadirse que no produce tensiones mecánicas sobre la pieza y que su relativamente elevada tasa de eliminación de material asegura una amplia área de aplicaciones para esta tecnología.

Además, Cabanes *et al.*^[31] afirman que a pesar de que el mecanizado de componentes cerámicos

de precisión supone un porcentaje elevado del coste correspondiente a la pieza final, el método de la electroerosión, para el caso de la fabricación de componentes de carburo de boro, confirma una reducción significativa del coste final (aproximadamente del 45 %) frente a otros métodos de mecanizado tales como el mecanizado por ultrasonidos.

El proceso de la electroerosión puede, además, utilizarse en aplicaciones donde los procesos de mecanizado de tipo mecánico no pueden llevarse a cabo debido a ciertas limitaciones de origen mecánico tales como una elevada dureza o una fragilidad excesiva del material, entre otras. Con respecto al mecanizado de los materiales cerámicos, dicho proceso resulta ser una alternativa muy interesante frente a las técnicas de mecanizado tradicionales, tales como pueden ser el rectificado, el fresado, el torneado o el corte con sierra, entre otras^[72]. Por otro lado, las velocidades de mecanizado sobre materiales cerámicos conductores, documentadas hasta la fecha, son mucho mejores que las que se obtienen normalmente cuando se usan procesos de mecanizado convencional^[30, 31, 53 y 66-70].

6. CONCLUSIONES

En los últimos veinte años se ha constatado un enorme aumento en el interés de los materiales cerámicos. A consecuencia de tal interés, se han producido avances significativos en su desarrollo y utilización. Existen un gran número de aplicaciones que aprovechan las propiedades especiales de estos materiales, tales como su elevada dureza y resistencia a altas temperaturas, su estabilidad química, su baja fricción y su gran resistencia al desgaste.

A pesar de sus excepcionales propiedades mecánicas y químicas, en comparación con los materiales metálicos, los materiales cerámicos únicamente han conseguido una aceptación parcial en el campo de las aplicaciones industriales^[70], debido a las dificultades y a los elevados costes asociados a su fabricación. En los últimos años, los avances en el campo de la electroerosión han permitido la aplicación de esta tecnología en la fabricación de materiales cerámicos electroconductores. Bajo tal denominación se incluyen tanto a los denominados materiales cerámicos conductores intrínsecos (tales como B_4C y TiB_2), como a los materiales cerámicos no conductoras, dopados con elementos electroconductores (tales como $Al_2O_3 + TiC$, $SiSiC$ y $ZrO_2 + CaO$). En base al conocimiento actual, el principal inconveniente a la hora de aplicar la tecnología de la electroerosión por

penetración al caso de los materiales cerámicos es la conductividad eléctrica de los mismos, habiéndose fijado la frontera para el caso de una resistividad eléctrica de 100 ó 300 $\Omega \cdot cm$ dependiendo de los investigadores^[52, 65 y 70].

Actualmente, existe una carencia de trabajos que estudien en profundidad la aplicación de la tecnología de la electroerosión al mecanizado de los materiales cerámicos conductores. Además, se considera que la versatilidad de dicha tecnología, junto con su emergente y potencial campo de aplicación, hará que, en un futuro, el campo de la electroerosión por penetración de los materiales cerámicos conductores se consolide a niveles próximos a la aplicación de dicha tecnología a los materiales metálicos.

REFERENCIAS

- [1] J.R. DAVIS, *ASM Materials Engineering Dictionary*, ASM International, 1ª Edición, USA, 1992, pp. 9, 68-71, 141-142, 263, 460-461.
- [2] W. KÖNIG, D.F. DAUW, G. LEVY Y U. PANTEN, *CIRP Annals* 2 (1988) 623-631.
- [3] T.C. LEE Y W.S. LAU, *Mater. Manuf. Process.* 4 (1991) 635-648.
- [4] Y.K. LOK Y T.C. LEE, *J. Mater. Process. Tech.* 63 (1997) 839-843.
- [5] I.P. TUERSLEY, A. JAWAID Y I.R. PASHBY, *J. Mater. Process. Tech.* 4 (1994) 377-390.
- [6] W. KÖNIG, L. CRONJÄGER, G. SPUR, H.K. TÖNSHOFF, M. VIGNEAU Y W.J. ZDEBLICK, *CIRP Annals* 2 (1990) 673-681.
- [7] C.C. LIU Y J.L. HUANG, *Brit. Ceram. T.* 4 (2000) 149-152.
- [8] R.W. RICE, *Ceramic Eng. Sci. Proc.* 7-8 (1981) 661-681.
- [9] J.J. SCHULDIES Y J.A. BRANCH, *Using Advanced Ceramics in Manufacturing Applications Conference*, Cincinnati, USA, 1991, SME, 1991, Technical Paper EM91-250 1-17.
- [10] Y. HUANG Y C.A. WANG, *Key Eng. Mater.* 161-163 (1999) 345-348.
- [11] E. LAARZ, M. CARLSSON, B. VIVIEN, M. JOHNSON, M. NYGREN Y L. BERGSTRÖM, *J. Eur. Ceram. Soc.* 21 (2001) 1.027-1.035.
- [12] K. ZENG, A. ODEN Y D. ROWCLIFFE, *Int. J. Prosthodont.* 11 (1998) 183-189.
- [13] B. CALES, *XI International Symposium on Ceramics in Medicine*, vol. XI, New York, USA, 1998, R. Z. LeGeros y J. R. LeGeros (Eds.), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1998.
- [14] T.S. SHEU, C.J. OU, L.Y. HON Y D.Y. CHEN, *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)* 4 (2000) 301-305.
- [15] U. EFFNER Y M. WOYDT, *Wear* 216 (1998) 123-130.
- [16] A. KRELL, P. BLANK, L.M. BERGER Y V. RICHTER, *Am. Ceram. Soc. Bull.* Diciembre (1999) 65-73.

- [17] POCO GRAPHITE, Inc., *EDM Technical Manual*, Poco Graphite Inc., Decatur, USA, 1994, pp. 8-1, 8-4.
- [18] X. ZHONG Y H. ZHAO, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 6 (1999) 98.
- [19] L.J. FRISK Y B. LINDER, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 11 (2001) Manufacturing Briefs 1-3.
- [20] W.D. CARRUTHERS Y J.R. SMYTH, *American Society of Mechanical Engineers*, 1991, Technical Paper 91-GT-368.
- [21] P.J. HALEY, *American Society of Mechanical Engineers*, 1988, Technical Paper 89-GT-118.
- [22] W.M. KAYS Y A.L. LONDON, *Compact Heat Exchangers*, Ed. McGraw-Hill, 3ª Edición, New York, USA, 1984.
- [23] M.L. TORTI, N.I. PAILLE Y J.J. LITWINOWICH, *Am. Cer. Soc.* 14 (1985) 291-300.
- [24] M.W. WOODS, P.C. GLANCE Y E. SCHWARZ, *Society of Automotive Engineers*, 1990, Technical Paper n° 900623.
- [25] R. KAMO, *Energy* 10-11 (1987) 1.073-1.080.
- [26] K. UPADHYA, J.M. YANG Y W.P. HOFFMAN, *Am. Ceram. Soc. Bull.* Diciembre (1997) 51-56.
- [27] T. ABRAHAM, *Am. Ceram. Soc. Bull.* Septiembre (2000) 45-47.
- [28] T.G. REYNOLDS, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 80 (10) (2001) Electronics 1-5.
- [29] A. KRUSING, S. LEPPÄVUORI, A. UUSIMÄKI, B. PETRÉTIS Y O. MAKAROVA, *Sensor. Actuat. A-Phys.* 74 (1999) 45-51.
- [30] I. CABANES, J.A. SÁNCHEZ, L.N. LÓPEZ DE LACALLE Y A. LAMIKIZ, *IMHE* Mayo (2001) 63-72.
- [31] I. CABANES, J.A. SÁNCHEZ, A. LAMIKIZ, M. GUTIÉRREZ, A. ODRIOZOLA Y I. AGOTE, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, vol. III, Leganés, España, 2000, V. Díaz, J. C. García y J. L. San Román (Eds.), Universidad Carlos III de Madrid, España, 2000, pp. 2.219-2.224.
- [32] J.A. SÁNCHEZ, I. CABANES, J. URQUIOLA, X. MAIDAGAN Y L.N. LÓPEZ DE LACALLE, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, vol. III, Leganés, España, 2000, V. Díaz, J. C. García y J. L. San Román (Eds.), Universidad Carlos III de Madrid, España, 2000, pp. 2.077-2.082.
- [33] C.F. NOBLE, A.J. AJMAL Y L.F. GREEN, *International Symposium of Electro Machining-ISEM 7*, Birmingham, England, 1983, 305-312.
- [34] R.H. JONES, H.L. HEINISCH, D. STEINER, G.A. NEWSOME Y H.M. KERCH, *J. Nucl. Mater.* 245 (2-3) (1997) 87-107.
- [35] A. HASEGAWA, A. KOHYAMA, R.H. JONES, L.L. SNEAD, B. RICCARDI Y P. FENICI, *J. Nucl. Mater.* 283-287 (0) (2000) 128-137.
- [36] E.H. FARNUM Y F.W. CLINARD, *J. Nucl. Mater.* 219 (0) (1995) 161-164.
- [37] T. SHIKAMA, K. YASUDA, C. KINOSHITA, S. YAMAMOTO, S.J. ZINKLE Y E.R. HODGSON, *J. Nucl. Mater.* 271-272 (0) (1999) 560-568.
- [38] L.A. LIEW, W. ZHANG, L. AN, S. SHAH, R. LUO, Y. LUI, T. CROSS, M.L. DUNN, V. BRIGHT, R. RAJ Y K. ANSETH, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 80 (5) (2001) 25-30.
- [39] S. ASHLEY, *Mech. Eng.* Octubre (1997) 78-84.
- [40] J.X. DENG Y T.C. LEE, *Surf. Eng.* 5 (2000) 411-414.
- [41] T. LEE Y J. DENG, *J. Eur. Ceram. Soc.* 22 (2002) 545-550.
- [42] R.F. FIRESTONE, *Advanced Ceramics '87*, Cincinnati, USA, 1987, SME, 1987, Technical Paper MR87-112 1-6.
- [43] W.J. KENNEDY Y E.C. SKAAR, *Non-traditional Machining Conference*, Orlando, USA, 1989, SME, 1989, Technical Paper MS89-813 1-16.
- [44] R.L. ALLOR Y S. JAHANMIR, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 75 (7) (1996) 40-43.
- [45] W. KÖNIG Y J. WEMHÖNER, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 68 (3) (1989) 545-548.
- [46] K. SUZUKI, T. UETAMATSU Y T. NAKAGAWA, *CIRP Annals* 1 (1987) 115-118.
- [47] R. KOMANDURI, *Mech. Eng.* 115 (4) (1993) 58-66.
- [48] P. HEYL, T. OLSCHESKI, R.W. WIJNAENDTS, *Microelectron. Eng.* 57-58 (2001) 775-780.
- [49] G. BERKHAHN, *Fabtech International Conference*, Rosemont, USA, 1989, SME, 1989, Technical Paper MS89-552 1-28.
- [50] R.F. FIRESTONE Y E.J. VESELEY, *Symposium on Machining of Advanced Ceramics Materials*, 1988, pp. 215-227.
- [51] C. LIPPINCOTT, *Finishing Automotive Plastics Clinic*, Novi, USA, 1989, SME, 1989, Technical Paper EM89-516 1-8.
- [52] F. PETROFES Y A.M. GADALLA, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 6 (1988) 1.048-1.052.
- [53] A. PITMAN Y J. HUDDLESTON, *Brit. Ceram. T.* 99 (2) (2000) 77-84.
- [54] N. MOHRI, Y. FUKUZAWA, T. TANI, N. SAITO Y K. FURUTANI, *CIRP Annals* 1 (1996) 201-204.
- [55] K.P. RAJURKAR, *EDM Clinic*, Cincinnati, USA, 1988, SME, 1988, Technical Paper MR88-223 1-15.
- [56] K.P. RAJURKAR, *Electrical Discharge Machining Clinic*, Grand Rapids, USA, 1991, SME, 1991, Technical Paper MS91-486 1-13.
- [57] J.S. WEBER, *Lamination Dies Clinic Conference*, Miami Beach, USA, 1981, SME, 1982, Technical Paper MR82-900 1-11.
- [58] J. SERAFIN, *International Engineering Conference*, Cleveland, USA, 1984, SME, 1984, Technical Paper MR84-262 1-12.
- [59] P.F. BECHER Y K.P. PLUCKNETT, *J. Eur. Ceram. Soc.* 18 (1997) 395-400.
- [60] F. MÜLLER Y J. MONAGHAN, *Int. J. Mach. Tool. Manu.* 40 (2000) 1.351-1.366.
- [61] I. PUERTAS Y C.J. LUIS, *Proc. of the International Conference on Advanced Materials Processing Technologies (AMPT'01)*, vol. II, Leganés, España, 2001, J. M. Torralba (Ed.), Universidad Carlos III de Madrid, España, 2001, pp. 1.173-1.180.
- [62] B. CASAS, E. MARTÍNEZ, J. ESTEVE, M. ANGLADA Y L. LLANES, *Rev. Metal. Madrid* 37 (2001) 140-144.
- [63] M. NAKAMURA, *Int. J. Jpn. S. Prec. Eng.* 57 (1991) 957-963.

- [64] Y. OKIYAMA, *Tool Engineer* 12 (1991) 75-80.
- [65] N.L. MORDECAI, T.C. LEE Y J. HUDDLESTON, *Brit. Ceram. T.* 1 (1995) 21-24.
- [66] J.A. SÁNCHEZ, I. CABANES, L.N. LÓPEZ DE LACALLE Y A. LAMIKIZ, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 18 (2001) 897-905.
- [67] X. DE MAIDAGAN, J.A. SÁNCHEZ, J.I. LLORENTE, R. LENZEN Y T. NÖTHER, *IMHE* Junio/Julio (2000) 43-48.
- [68] I. CABANES, I. CALVO, J.M. MIRA Y J.A. SÁNCHEZ, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, vol. III, Leganés, España, 2000, V. Díaz, J. C. García y J. L. San Román (Eds.), Universidad Carlos III de Madrid, España, 2000, pp. 2.143-2.148.
- [69] C.S. TRUEMAN Y J. HUDDLESTON, *J. Eur. Ceram. Soc.* 20 (2000) 1.629-1.635.
- [70] J.H. ZHANG, T.C. LEE Y W.S. LAU, *J. Mater. Process. Tech.* 63 (1997) 908-912.
- [71] R.W. DAVIDGE, *Mechanical Behaviour of Ceramics*, Cambridge University Press, India, 1979, pp. 132-156.
- [72] D.F. DAUW, C.A. BROWN, J.P. VAN GRIETHUYSEN Y J.F.L.M. ALBERT, *CIRP Annals* 39 (1) (1990) 161-165.
- [73] M. RAMULU Y J.L. GARBINI, *J. Eng. Mater.-T. ASME* 113 (4) (1991) 437-442.
- [74] A. GIL-NEGRETE, J.A. TAGLE, J.C. MÚGICA Y J.I. OÑATE, *Tecnologías Asistidas por Plasma. Fundamentos, Aplicaciones Industriales y Tecnológicas*, Ed. McGraw-Hill, 1ª Edición, España, 1997, pp. 51-80.
- [75] T.B. THOE, D.K. ASPINWALL Y N. KILLEY, *J. Mater. Process. Tech.* 92-93 (1999) 323-328.
- [76] A.G. MAMALIS, N.M. VAXEVANIDIS Y D.I. PANTELIS, *CIRP Annals* 41 (1) (1992) 235-238.