

COMPOSITOS CERÁMICOS BASE MULLITA/Co, Ti, Ni, Cu y ZrO₂ MANUFACTURADOS POR METALURGIA DE POLVOS

MULLITE/Co, Ti, Ni, Cu AND ZrO₂ MATRIX CERAMIC COMPOSITES MANUFACTURED BY POWDER METALLURGY

**José G. Miranda-Hernández^{1,*}, Héctor Herrera-Hernández¹, Elizabeth Refugio-García²,
Enrique Rocha-Rangel³, José M. Juárez García⁴.**

(1) Universidad Autónoma del Estado de México, CU-UAEM-Valle de México, Blvd. Universitario S/N, Predio San Javier, 54500 Atizapán de Zaragoza, México

(2) Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Departamento de Materiales, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa-Tamaulipas, 02200 México, D.F. – México

(3) Universidad Politécnica de Victoria, Av. Nuevas Tecnologías 5902, Parque Científico y Tecnológico de Tamaulipas, 87138 Ciudad Victoria, Tamaulipas - México

(4) Centro Nacional de Metrología, Laboratorio de Microanálisis, km 4.5 de la Carretera a los Cues, El Marqués, Querétaro, México

*autor de contacto (e-mail: jgmirandah@uaemex.mx)

Recibido: 11/04/2014 - Evaluado: 09/06/2014 - Aceptado: 17/07/2014

RESUMEN

Mediante la técnica de metalurgia de polvos se fabricaron compositos base mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) reforzados con partículas de Co, Ti, Ni, Cu y ZrO₂ a partir de polvos a una composición final del 10% con la finalidad de analizar el efecto del refuerzo. Los polvos son compactados a 300 MPa formando compactos cilíndricos que posteriormente son sinterizados a 1400°C por 1 hora en atmósfera de gas nitrógeno. Se determina la densidad por el método de Arquímedes, se caracteriza microestructuralmente por microscopía óptica y electrónica de barrido y se determina la resistencia eléctrica por la técnica de cuatro puntos con el fin de determinar sus características conductoras. Los resultados indican que el composito reforzado con partículas de Cu es el que mejor densifica, el análisis microestructural permite observar la distribución homogénea de las partículas reforzantes y el comportamiento de la resistencia eléctrica presenta variación con respecto al material de refuerzo.

ABSTRACT

In order to analyze the support effect, mullite matrix composites ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) reinforced with Co, Ti, Ni, Cu and ZrO₂ powder particles to a 10% final composition were manufactured by powder metallurgy technique. Powders are compacted to 300 MPa and formed cylindrical compacts that are synthesized to 1400 °C by one hour in a gas nitrogen atmosphere. The density is determined by Archimedes method that is microstructural characterized by optical and electronic sweep microscopy, and the electric resistance is determined through four point's technique in order to define the conductor characteristics. The results indicated that the best densifying is the reinforced composite with Cu particles; the microstructural analysis provides a view of the homogenous distribution of the reinforced particles; and the electric resistance behavior presents a variation with respect to the reinforcement material.

Palabras clave: manufactura; compositos; mullita; partículas
Keywords: manufacture; composites; mullite; particles

INTRODUCCIÓN

La mullita es un compuesto intermedio en el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, que presenta elevadas temperaturas de fusión y su concentración varía entre 68 y 76% en peso de alúmina (Al_2O_3), a pesar de que la mullita se forma a presiones atmosféricas, es un mineral raro que no se encuentra en cantidades abundantes en la naturaleza como lo indican Shackelford y Doremus (2008). Este tipo de cerámico generalmente tiene diferentes aplicaciones, desde la cerámica tradicional, hasta la cerámica avanzada; se caracteriza por tener excelentes propiedades mecánicas como son: altos módulos de ruptura y resistencia a la compresión tanto en frío como en caliente, estabilidad química, estabilidad térmica reflejada por su bajo coeficiente de expansión térmica (Schneider *et al.*, 2008), de entre otros usos de la mullita se han fabricado espumas cerámicas a partir de pastas refractarias aprovechando las ventajas de la fase mullítica para someterlas a trabajos de alta temperatura (Juettner *et al.*, 2007). Ante toda la diversificación de aplicaciones, la mullita presenta deficiencia en su tenacidad a la fractura, por lo cual, en algunos estudios se ha planteado emplear diferentes materiales de refuerzo, los cuales han modificado la microestructura y algunas propiedades mecánicas (Refugio *et al.*, 2013; Badiie *et al.*, 2012), este comportamiento en la modificación de las propiedades mecánicas y eléctricas no es privativo de la mullita también se ha observado en compositos cerámicos base alúmina (Rocha *et al.*, 2009; Miranda *et al.*, 2006; Gutiérrez *et al.*, 2008; Camerucci *et al.*, 2000). En el caso de la mullita el reforzamiento con partículas de segunda fase como SiC y fibras de Al_2O_3 , han demostrado mejoras en las propiedades (Claussen & Petzow, 1986), en otros casos también se ha estudiado el reforzamiento de mullita con ZrO_2 en los que se ha incrementado la resistencia y tenacidad a temperaturas bajas e intermedias, como lo mencionan Nisehik *et al.* (1991). En este último sistema la síntesis de estos compuestos se ha llevado a cabo por rutas de procesamiento con tecnología avanzada, como la sinterización reactiva de Al_2O_3 y SiO_2 con adiciones ZrO_2 (Koyama *et al.*, 1995) y sinterización asistida por plasma de cerámicos reforzados mullita- ZrO_2 , en donde se han obtenido materiales densos y con valores elevados de la tenacidad a la fractura (De la Torre *et al.*, 2000). Por lo tanto, los cerámicos de matriz de mullita reforzados con diferentes partículas metálicas que se fabrican por estos métodos son homogéneas en su composición química y por consiguiente presentan alta resistencia mecánica. Sin embargo, este tipo de procesamiento es costoso y requiere equipo especial para llevarlo a cabo. La Metalurgia de Polvos es una técnica que permite fabricar cualquier sistema de materiales y todo tipo de aleaciones a un bajo costo (McMahon Jr., 2004; Matthew & Stephen, 2002). Con esta técnica un material en polvo es acondicionado mediante molienda mecánica, prensado y posteriormente sinterizado a elevadas temperaturas sin alcanzar su punto de fusión, con lo que se obtienen productos con alto valor agregado, dado las muy peculiares microestructuras que se obtienen en este tipo de materiales, características que se ven reflejadas en elevadas propiedades mecánicas (Wessel, 2004).

METODOLOGÍA

Los materiales empleados para la fabricación de los diferentes compuestos base cerámica son: polvos cerámicos de mullita y ZrO_2 (99.9 % de pureza, 1 μm , Sigma, USA) y polvos metálicos de Co, Ni, Ti, Cu (99.9 % pureza, 1-2 μm , Aldrich, USA). La cantidad de polvos metálicos y cerámicos utilizados fue aquella que permitiera la fabricación de cerámicos base mullita con una composición química final del 10% en peso de los diferentes polvos de refuerzo (Co, Ti, Ni, ZrO_2 y Cu). Mediante una mezcla-molienda de polvos de mullita con adiciones de Co, Ti, Ni, ZrO_2 y Cu, se fabricaron diferentes materiales compuestos identificados como C-Co, C-Ti, C-Ni, C- ZrO_2 y C-Cu. Las mezclas de polvos se prepararon en un contenedor de alta alúmina con sello hermético en seco mediante un molino de bolas horizontal rotatorio de baja energía LABMILL-8000-CP y medios de molienda de ZrO_2 con la finalidad de prevenir la contaminación de la composición a una velocidad de rotación de 350 rpm y un tiempo de molienda de 12 horas, posterior la mezcla de polvos es recuperada para fabricar compactos cilíndricos de 2 cm de diámetro por 0.3 cm de espesor mediante dados de tres piezas de acero inoxidable por prensado uniaxial en frío aplicando una carga de 300 MPa con ayuda de una prensa hidráulica semiautomática FIIC de 30 toneladas de carga máxima. Posteriormente, las muestras prensadas fueron sinterizadas a 1400°C en un horno de alta temperatura Carbolite, Novus con controlador de temperatura durante una hora en presencia

de una atmósfera protectora de gas argón a velocidad de calentamiento de 10°C/min. Las muestras finales fueron preparadas metalográficamente y caracterizadas de la siguiente manera: La densidad fue determinada por el método de Arquímedes con ayuda de una balanza analítica de alta sensibilidad de la marca Ohaus, los rasgos microestructurales se observaron empleando técnicas de microscopía óptica (OM) mediante un microscopio metalográfico invertido Olympus 5X y microscopía electrónica de barrido (SEM) con un microscopio Jeol-JSM-6400, este último está equipado con un detector por espectroscopia de difracción de rayos-X (EDX) con el que se realizaron diversos análisis químicos en diferentes zonas de las muestras. Asimismo, se midió la dureza de cada muestra empleando un indentador de diamante Vickers en un microdurómetro Durascan-Emcotest y finalmente se preparan las muestras adhiriendo dos conductores eléctricos en las superficies de los compuestos previamente preparados con pintura de plata para formar el circuito eléctrico y evaluar la resistencia eléctrica con la técnica de cuatro puntos mediante un multímetro digital de alta sensibilidad Agilent 34401A y una fuente de corriente de 40A Steren.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad

La densidad determinada de los composites fabricados muestran una variación a partir de los diferentes materiales de refuerzo debido principalmente a la densidad correspondiente de cada elemento, los valores de densidad teórica, experimental y porcentaje de densificación se aprecian en la Tabla 1. Se observa que el material con mayor porcentaje de densificación es el composite reforzado con partículas de Cu, seguido en orden descendente de los compuestos reforzados con Ti, ZrO₂, Ni y Co. En este sentido considerando que la temperatura máxima de sinterización para los materiales sinterizados fue de 1400°C, y sabiendo que la temperatura de fusión del cobre está por debajo de esta (1083°C) se presume que el compuesto C-Cu alcanza mejor densificación con respecto del resto de los materiales, debido a que el proceso de sinterización se lleva a cabo en presencia de una fase líquida. La presencia de esta fase líquida durante la sinterización, otorga a este proceso una ventaja sobre la sinterización en fase sólida, ya que proporciona tanto una fuerza de capilaridad como un medio de transporte más efectivo lo que conduce a una rápida consolidación y sinterización (Bris, 2006; Miranda, 2011). La fuerza de capilaridad debida al fenómeno de mojabilidad del metal líquido en el cerámico proporciona una compacta y rápida densificación, aunque también es sabido que la mojabilidad en muchos sistemas metal líquido-cerámico es limitada, principalmente si se trata de sistemas en donde el cerámico es un óxido debido al alto grado de enlace iónico que presentan los óxidos cerámicos (Rocha *et al.*, 2004), aunque la mojabilidad de los metales líquidos en óxidos incrementa al aumentar la afinidad del metal por el oxígeno. Para el caso de los compuestos C-Co, C-Ti, C-Ni, C-ZrO₂ el proceso de sinterización ocurre en fases sólidas debido a que la temperatura de fusión de los elementos de refuerzo está por encima de los 1400°C, la única influencia a considerar en la densificación es el fenómeno de difusión directamente ligado a la temperatura de trabajo, el tiempo y porcentaje de la partículas metálicas presentes en el sistema, aunque otro factor que puede afectar es la densificación propia de los metales de refuerzo. Es notable que aunque la densidad experimental no presenta gran diferencia en todos los compuestos el porcentaje de densificación marca la diferencia debido a que este es determinado con respecto a densidad teórica de los composites donde se considera la composición final del material.

Tabla 1: Valores de densidad y porcentaje de densificación de los composites fabricados

Compuesto	C-Co	C-Ti	C-Ni	C-ZrO ₂	C-Cu
Densidad teórica (g/cm ³)	3.73	3.30	3.74	3.41	3.75
Densidad experimental (g/cm ³)	2.97	3.11	3.05	3.09	3.50
% de densificación	79.6	94.2	81.6	90.6	94.6

Microestructura

Las microestructuras obtenidas por microscopía óptica (MO) de los composites fabricados se presentan en la Figura 1. En estas micrografías se puede observar la presencia y distribución homogénea de las partículas metálicas de refuerzo en la matriz del cerámico para los compuestos C-Co, C-Ni y C-Ti, aunque el tamaño y la morfología de estas es diferente en cada caso. Las partículas metálicas son notables en una segunda fase clara brillante, para el compuesto C-ZrO₂ la identificación de las partículas de refuerzo se aprecian como una fase clara a diferencia de la fase del cerámico que es más opaca, el caso del C-Cu se discute en párrafos siguientes. En esta misma figura se aprecia la microestructura de la muestra testigo o blanca correspondiente a mullita pura, donde es notable la presencia únicamente de poros y se aprecia la consolidación del cerámico por efectos de difusión provocado en el proceso de sinterización

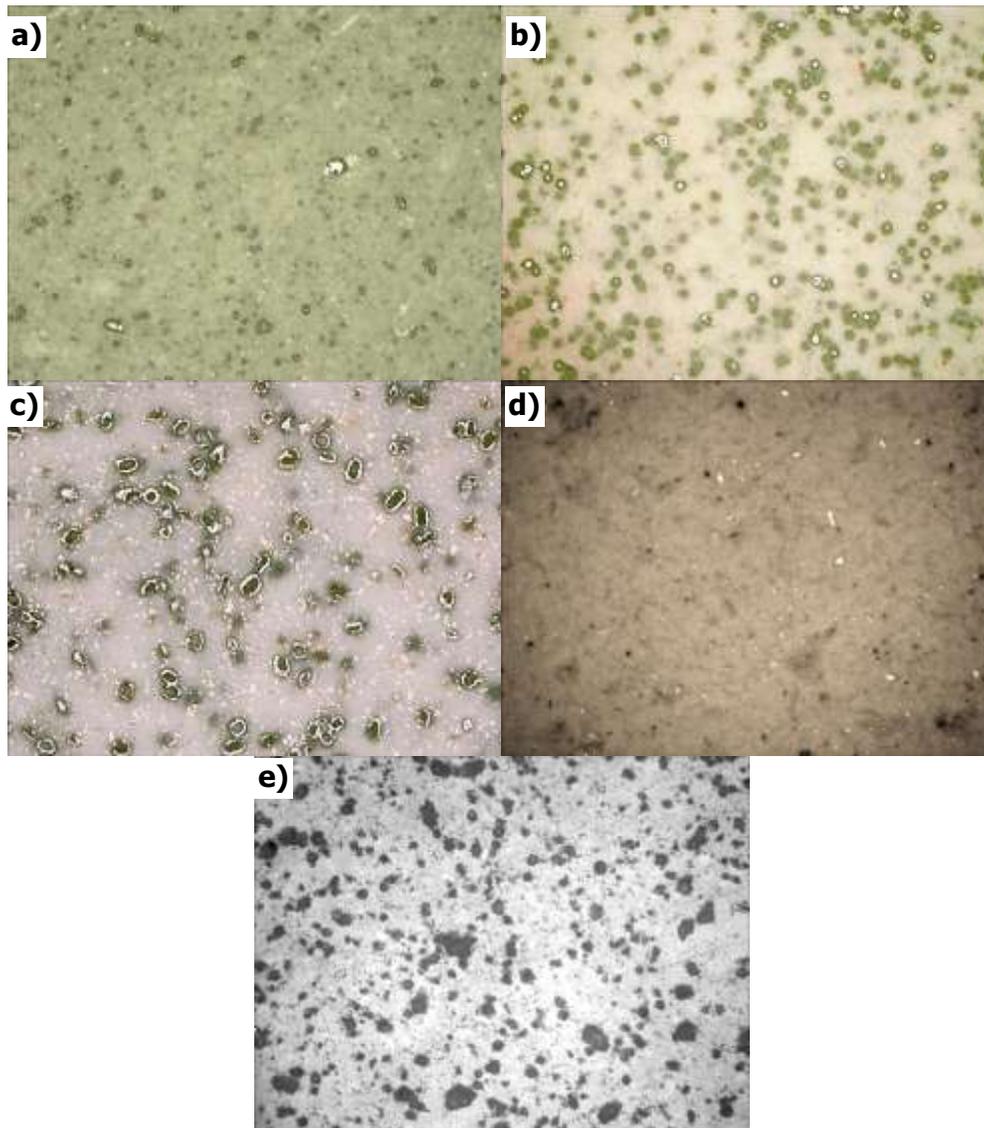


Fig. 1: Microestructuras 10X MO, de los composites fabricados: a) C-Co, b) C-Ni, c) C-Ti, d) C-ZrO₂ y e) Mullita.

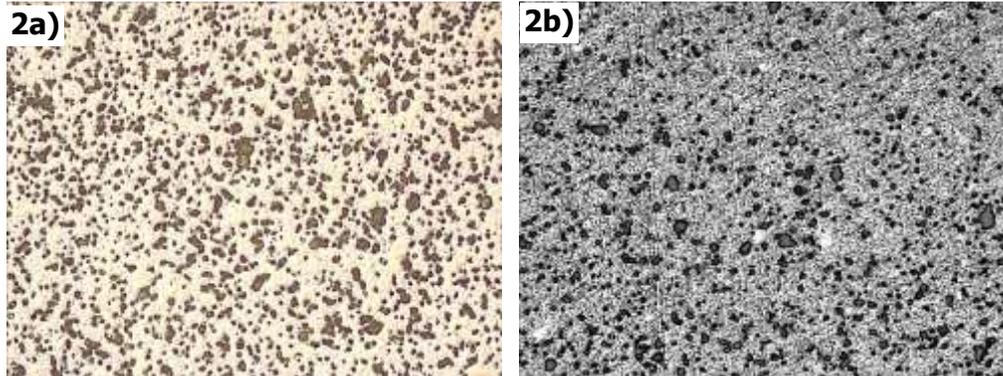


Fig. 2: Microestructuras 10X MO, del compuesto C-Cu.

Por otra parte en las Figuras 1 y 2 es notable indudablemente la presencia de poros como una tercera fase oscura y puntual ya que la presencia de porosidad es característica de este tipo de materiales, la presencia de micro-poros indica que el material no está densificado en su totalidad como se analizó anteriormente; esto es, entre mayor es la presencia de micro-poros la densidad en el material es afectada directamente aunque se debe considerar también el factor del tamaño promedio de los micro-poros en cada material y la forma en que se llevó el proceso de sinterización, la forma y el tamaño de los micro-poros es comparable debido a que las fotomicrografías son tomadas a los mismos aumentos 10X.

Para el caso particular del C-Cu vea figura 2a, no se aprecia la distribución de partículas de Cu, recordemos que anteriormente se discutió que el proceso de sinterización en este compuesto se lleva a cabo en presencia de una fase líquida considerando que la mojabilidad del metal líquido en el cerámico trae consigo una mejor densificación del material. Esta consideración es la causa por la cual no es notable el Cu en forma de partículas pero nótese el tono real de la superficie de este compuesto ya que tiene el tono característico del metal Cu permitiéndonos asegurar el mojado del metal en el cerámico (Fig. 2a), a la par de la Figura 2a, observe la Figura 2b en tonos grises, aquí es notable por contraste la presencia del metal en la matriz en una fase clara brillante en una interconexión del metal mediante una red metálica en el cerámico formando una microestructura característica de este tipo de materiales.

En la Figura 3 se muestran las fotomicrografías tomadas por microscopía electrónica de barrido de los composites fabricados. En esta figura es clara la diferencia microestructural en los diferentes composites, en la figura 3c que corresponde al compuesto C-Ti es notable la presencia de cristales metálicos de titanio como fase clara brillante anclados a la base del cerámico de fase gris que actúan como refuerzo del cerámico, proporcionalmente se puede observar de igual manera pequeños cristales de ZrO_2 en la figura 3d correspondiente al compuesto C- ZrO_2 , esto reafirma lo dicho anterior al respecto del porcentaje de densificación de estos materiales fenómeno también observado en sistemas cerámicos reforzados con zirconia (Wahsh *et al.*, 2012), a diferencia de la figura 3a que refiere al compuesto C-Co aquí es notable tres fases la fase correspondiente al metal como la fase clara brillante, la fase gris clara y la tercera fase gris oscura que representa la porosidad que aunque es notable los poros son pequeños, así mismo en el compuesto C-Ni correspondiente a la figura 3b que al respecto del compuesto con Co este presenta porosidad mas grande.

Con sentido de analizar el caso del compuesto C-Cu en la Figura 4 se observa un tipo de estructura completamente distinta a lo analizado en las microestructuras de la Figura 3. En la figura 4a se puede observar la presencia de micro-poros, pero en estricto sentido se aprecia como la matriz cerámica está completamente impregnada de partículas metálicas que se aprecian como una fase clara brillante en toda la matriz cerámica. Lo anterior dicho se confirma en la micrografía 4b a altos aumentos, en donde se parecían perfectamente una gran

cantidad de cristales anclados a la base del material y que como se comentó anteriormente es debido a la presencia de una fase líquida en proceso de sinterización que ha tenido como efecto el mejor porcentaje de densificación que el resto de los composites aunque muy parecido al compuesto C-Ti, el que se aprecia perfectamente el metal en forma de cristales que al igual tiene efecto en la buena densificación de este material.

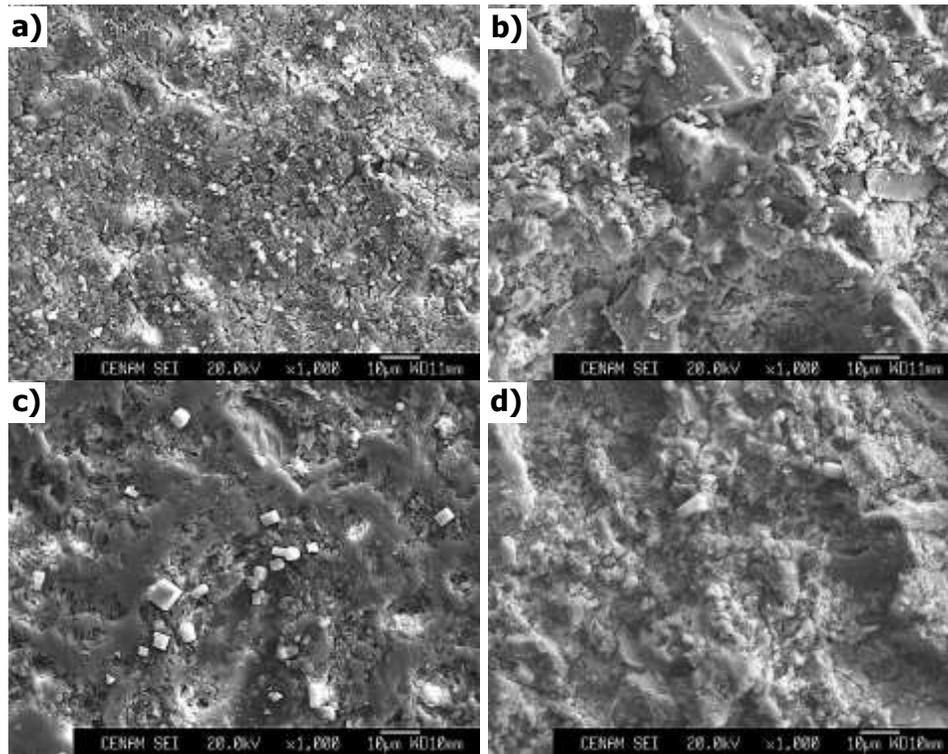


Fig. 3: Microestructuras SEM de los composites: a) C-Co, b) C-Ni, c) C-Ti y d) C-ZrO₂.

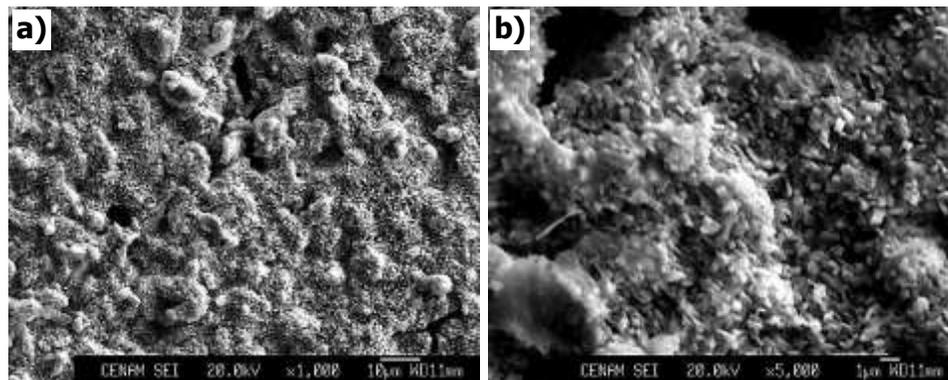


Fig. 4: Microestructuras por MEB del compuesto C-Cu.

La afirmación al respecto de que las partículas presentes como fase clara brillante corresponden a partículas metálicas es debida que en todos los casos y con ayuda de análisis de espectrometría de rayos-X (EDX) se determinó que estos precipitados corresponden a las partículas metálicas. Un espectro típico de este tipo de análisis por EDX que se obtuvo luego de realizar un análisis puntual en la microestructura se aprecia en la Figura 5 para el caso del compuesto C-Ti, teniendo como resultante los elementos que constituyen a la mullita y el metal de refuerzo.

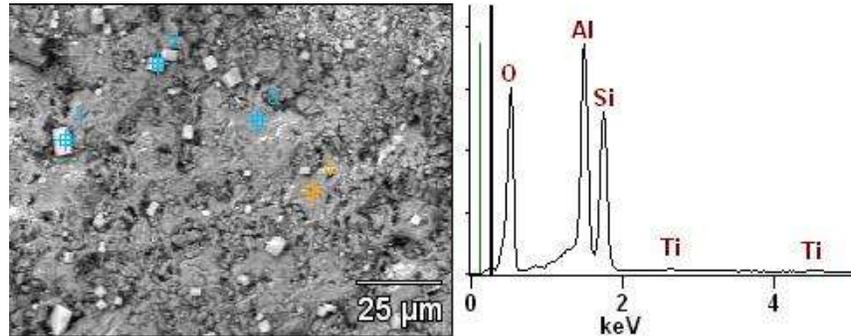


Fig. 5: Microestructura del compuesto C-Ti y espectro EDX del análisis puntual realizado en las partículas claras ubicadas en la matriz de mullita.

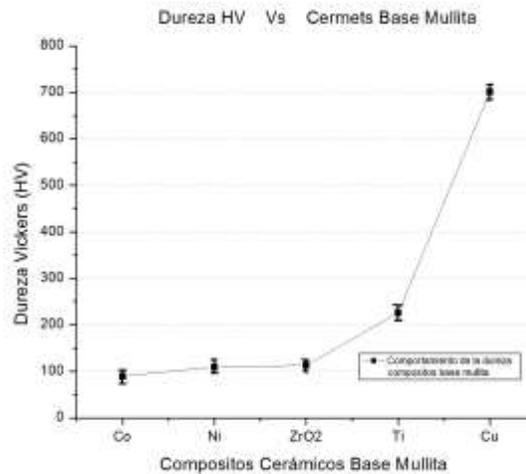


Fig. 6: Dureza de los compositos fabricados

Microdureza

La gráfica de la Figura 6 presenta el comportamiento de la dureza determinada a partir de los diferentes compositos cerámicos base mullita con respecto al material de refuerzo, la medida de esta variable se hizo para cuatro especímenes tomando ocho medidas de dureza dando un total de treinta y dos en cada sistema permitiendo determinar la desviación de la medida. El comportamiento de este gráfico notablemente presenta un incremento en la dureza a partir del compuesto C-Co y que va en incremento seguido de los compuestos C-Ni, C-ZrO₂, C-Ti y C-Cu respectivamente, pero esta por debajo del valor de la muestra testigo fabricada bajo las mismas condiciones, esta muestra en blanco presenta una dureza de 790±15 HV. La explicación a esta variabilidad tomando como referencia la muestra testigo y que el proceso de síntesis es el mismo puede deberse http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/

a varios factores, en primer lugar a los diferentes materiales de refuerzo a causa de la densificación misma de estos materiales y al fenómeno de difusión o transferencia de masa en donde se involucran también fenómenos termodinámicos. El material fabricado que resulta con mayor dureza es el compuesto C-Cu, aunque en este trabajo no se pretende demostrar que el proceso de sinterización en presencia de una fase líquida es uno de los mejores procesos de sinterización de materiales por la ruta de metaurgia de polvos los resultados obtenidos en particular para este compuesto evidencian este fenómeno con respecto al resto de los materiales fabricados. Resulta fácil establecer que para estos materiales existe una relación directamente proporcional entre la dureza y el porcentaje de densificación, este comportamiento no es una ley ya que la densificación y la dureza son variables ligadas al factor de porosidad, a la carga de compactación de los compactos precursores a sinterizar y al tamaño de partícula de los polvos que forman los compactos, se ha encontrado en otras investigaciones que la dureza en el sistema mullita disminuye con el aumento de la porosidad (Camerucci *et al.*, 2000).

Resistencia eléctrica

La determinación de la resistencia eléctrica en un material es debido a que este material en principio permite o no el flujo eléctrico. Cuando el flujo de cargas eléctricas pasa a través de un material distinto al que inicialmente se le hace pasar la corriente se genera una caída de potencial debido a que existe una oposición al flujo de corriente en el circuito eléctrico como consecuencia de que el flujo de electrones cambia de medio de conducción, llamada resistencia eléctrica. Bajo este principio, se determina la resistencia eléctrica de los diferentes materiales compuestos mediante la relación entre la diferencia de potencial o caída de potencial que se genera en las muestras por efecto de la corriente eléctrica que se hace pasar a través de estas mediante el circuito eléctrico formado. La relación de los resultados obtenidos entre la corriente eléctrica inducida en el arreglo eléctrico en cada una de las muestras estudiadas con respecto a la caída de potencial eléctrico se aprecia en la gráfica de la Figura 7. Este gráfico presenta un comportamiento lineal en todos los materiales que permite determinar la resistencia eléctrica por medio de la ley de Ohm. El comportamiento lineal que se presenta en cada una de las composiciones permite establecer que la caída de potencial eléctrico es diferente en cada una de las muestras aun cuando la corriente eléctrica inducida es la misma, esto es indicativo de que la composición química en cada uno de los compuestos genera una oposición distinta al flujo de corriente eléctrica principalmente por el material de refuerzo en los diferentes compuestos y además por la misma naturaleza conductiva de estos, sin olvidar que la composición en porcentaje en peso es el mismo.

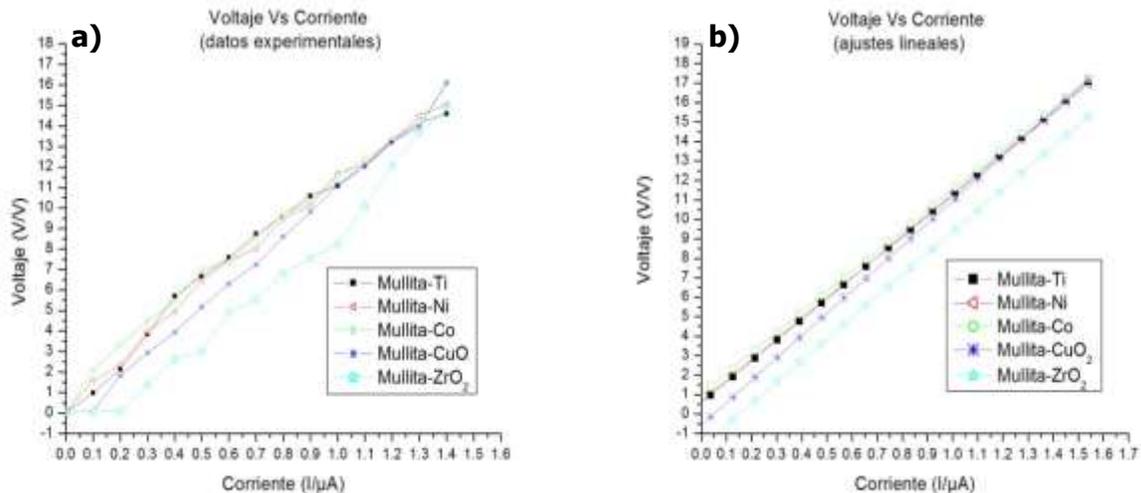


Fig. 7: Comportamiento de la caída de potencial con respecto a la corriente eléctrica inducida: a) relación de datos experimentales, b) regresión lineal.

En la Tabla 2 se puede apreciar el valor de la resistencia eléctrica determinada para cada uno de los materiales compuestos y se aprecia que el material de mayor resistencia eléctrica es el compuesto C-Cu, seguido sucesivamente de C-ZrO₂, C-Ni, C-Ti y M-Co. Es considerable que el compuesto reforzado a partir de óxidos como C-ZrO₂ sea uno de los materiales de mayor resistencia eléctrica en comparación de los refuerzos de naturaleza metálica, en la misma analogía se considera que aunque estos materiales fabricados presentan conductividad eléctrica, esta es mínima, ya que la resistencia eléctrica es grande en todos los casos; esto es, que la resistencia es del orden de 10⁶ Ω o mejor dicho del orden de los Mega-Ohms (MΩ), aun y cuando la diferencia de la resistencia eléctrica del mejor con el peor conductor sea de 1 MΩ. Para el caso del C-Cu se esperaría que este fuera uno de los compuestos con menor resistencia eléctrica debido a las características conductoras del Cu, pero nótese que anteriormente se dijo que era una de los compuestos con mayor presencia de poros y que de alguna manera es situación no afecto a la densidad y dureza, pero en este caso si afecta directamente a la resistencia eléctrica ya que la presencia de poros en el material rompe con la continuidad eléctrica del material reflejando un alta resistencia el flujo eléctrico, esto se ha observado en sistemas de materiales de base cerámica en donde no se analiza directamente la resistencia eléctrica, se analiza la constante dieléctrica y el comportamiento es lineal y en decremento con forme aumenta la porosidad debido al aumento del aire presente en los poros (Camerucci *et al.*, 2000).

Tabla 2: Valores de la resistencia eléctrica para cada compuesto

Compuestos	C-Co	C-Ti	C-Ni	C-ZrO ₂	C-Cu
R / MΩ	10.49	10.57	10.72	11.00	11.53

Otro factor de importancia al respecto de la resistencia eléctrica, que se aprecia en la Figura 7a, es que que el comportamiento del compuesto Mullita-ZrO₂, no tiene necesariamente una tendencia lineal en comparación con los demás compuestos. Para mejor apreciación ahora observe la figura 8, al analizar la tendencia de los valores experimentales y al hacer el ajuste lineal y compararlos con el ajuste polinomial notablemente este material no corresponde a un material óhmico por no presentar un comportamiento lineal, posiblemente será importante hacer consideraciones de que este compuesto tenga el comportamiento de un capacitor y no de un resistor.

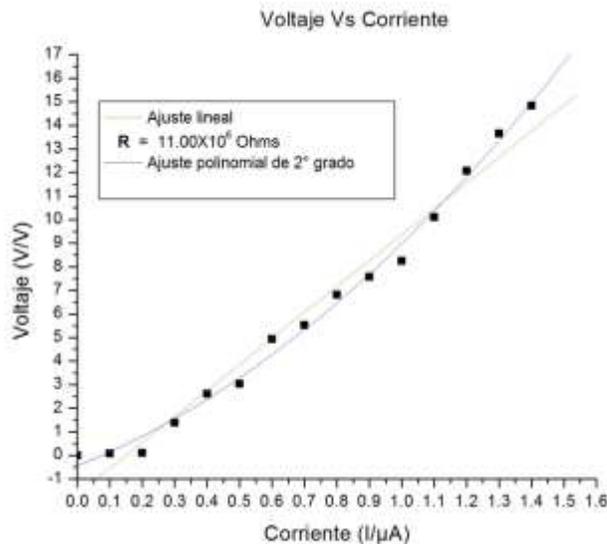


Fig. 8: Gráfico de la relación del ajuste lineal y polinomial para el compuesto C-ZrO₂.

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- A través de técnicas de metalurgia de polvos se fabricaron exitosamente composites cerámicos base mullita con adiciones de Cobalto, Nickel, Titanio, Oxido de Zircón y Cobre.
- La incorporación de materiales de refuerzo modifica la microestructura resultante de los compuestos, comprobando que la incorporación de estas partículas tiene un efecto importante en las propiedades microestructurales, densidad, dureza y resistencia eléctrica.
- La dureza determinada de los diferentes compuestos está por debajo de la dureza del material testigo; esto es indicio de que la incorporación de los materiales de refuerzo provoca decremento del valor de la dureza.
- La medición de la resistencia eléctrica en los materiales compuestos sintetizados fue posible debido a que se pudieron fabricar materiales con características de propiedades de semiconductores eléctricos.
- El material con mayor resistencia eléctrica ($11.53 \text{ M}\Omega/\text{cm}^2$) correspondiente al compuesto C-Cu y el de menor resistencia eléctrica es C-Co; es decir, que este último compuesto es el material con mejor conductividad eléctrica.
- El compuesto C-ZrO₂ no presenta comportamiento lineal con respecto a flujo de Voltaje Vs Corriente por lo que este material no presenta el comportamiento de un material óhmico, posiblemente se considera que tenga el comportamiento de un capacitor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo a los laboratorios de procesos de CU-UAEM-VM, UAM-A, UPV y al Laboratorio de Microanálisis del CENAM. Adicionalmente, JGMH agradece a la SEP por el apoyo otorgado a través del Convenio: Promep 103.5/13/6535. HHH agradece el apoyo otorgado por el CONACyT (distinción de investigador nacional SNI-1).

REFERENCIAS

1. Badiie, S.H., Otroj, S. & Rahmani, M. (2012). The effect of Nano-TiO₂ Addition on the Properties of Mullite-Zirconia Composites Prepared by Slip Casting. *Science of Sintering*, 44, 341-354
2. Bris-Cabrera, J.L. (2006). Comportamiento Mecánico de Aceros Sinterizados de Alta Densidad. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
3. Camerucci, M.A., Urretavizcaya, G. & Cavalieri, A.L. (2000). Evaluación Térmica, Mecánica y Eléctrica de Materiales Compuestos Cordierita-Mullita. *MR.*, 3(4), 124-130.
4. Claussen, N. & PeLzow, G. (1986). Whizker-Reinforced Zirconia-Toughened Ceramics. Tailoring Multiphase and Composite Ceramics, Materials Science Research, Volume 20 (Editors: Richard E. Tressler *et al.*), 649-662.
5. de la Torre, S.D., Miyamoto, H., Balmori Ramírcz, H. & Rocha Rangel, E. (2000). Sinterización asistida por plasma de cerámicos reforzados mullita-ZrO₂. *Revista Mexicana de Física*, 46 (6), 519-522.
6. Gutiérrez-González, C.F., Torrecillas, R., Moya J.S. & Bartolomé, J.F. (2008). Estudio de las Propiedades Mecánicas de Compuestos Al₂O₃- ZrO₂/Nb Micronanoestructurados, *Anales de Mecánica de la Fractura*, 1 (25), 79-84.
7. Juettner, T., Moertel, H., Svinka, V. & Svinka, R. (2007). Structure of kaoline-alumina based foam ceramics for high temperature applications. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 27, 1435-1441.
8. Koyama, T., Hayashi, S., Yasumori A. & Okada, K. (1995). Preparation and Characterization of Mullite-Zirconia Composites from Various Starting Materials., *J. Eur. Ceram. Trans.*, 51, 695-700.

9. Matthew, J.D. & Stephen, J.D. (2002). *Superalloys a technical guide*, second edition, ASM International, USA.
10. McMahon Jr., C.J. (2004). *Structural Materials*, Merion Books, pp. 315-348.
11. Miranda-Hernández, J.G. (2011). *Síntesis y Caracterización Mecánica de Materiales Funcionales Oxido-Metal-Nitruro*. Tesis de doctorado UAM, México D.F. 2011
12. Miranda Hernández, J.G., Moreno Guerrero, S., Soto Guzman, A.B. & Rocha Rangel, E. (2006). Production and Characterization of Al₂O₃-Cu Composite Materials. *JCPR*, 7(4), 311-314.
13. Nisehik, C., Seibold, M.M., Travitzky, N.A. & Claussell, N. (1991). Effect of Processing on Mechanical Properties of Platelet-Reinforced Mullite Composites. *J. Am. Ceram. Soc.*, 74(10), 2464-2468.
14. Rocha-Rangel, E., Becher, P.F. & Lara-Curzio, E. (2004). Unión entre metales y cerámicos, *Rev. Soc. Quím.*, 48, 146-150.
15. Refugio-García, E., Osorio-Ramos, J., Miranda-Hernández, J.G., Rodríguez-García, J.A. & Rocha-Rangel, E. (2013). Forming Mullite-Ceramics Reinforced With ZrO₂-t Starting From Mullite-ZrO₂-t and Kyanite-Al₂O₃-ZrO₂-t Mixtures. Processing and Properties of Advanced Ceramics and Composites V: *Ceram. Trans.*, 240 (Editors: Narottam P. Bansal, *et al.*), 111-117.
16. Rocha-Rangel, E., Refugio-García, E., Miranda-Hernández, J.G. & Terrés-Rojas, E. (2009). Fracture Toughness Enhancement for Metal-Reinforced Alumina. *JCPR*, 10(6), 744-747.
17. Schneider, H., Schreuer, J. & Hildmann, B. (2008). Structure and properties of mullita. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 28, 329-344.
18. Shackelford, J.F. & Doremus, R.H. (2008). *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*, Chapter 2, © Springer.
19. Wahsh, M.M.S., Khatlab, R.M. & Awaad, M. (2012). Thermo-mechanical Properties of Mullita/Zirconia Reinforced Alumina Ceramic Composites. *Mater. Des*, 41, 31-36.
20. Wessel, J.K. (2004). *The Handbook of Advanced Materials*, John Wiley & Sons, pp. 66-88.

