



Los materiales cerámicos: definición, clasificación y breve descripción de su estructura y propiedades

Lorena G. Cuéllar-Herrera¹, José Antonio Raya-Colín¹, C. Carrera-Figueiras²,
José Ortiz-Landeros¹

1. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, UPALM-Zacatenco, Avenida IPN S/N, Ciudad de México, CP. 07738, México

2. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán, Campus de Ciencias Exactas e Ingenierías, Periférico Norte, Km. 33.5, Tablaje Catastral 13615, Col. Chuburná de Hidalgo Inn, 97203, Mérida, Yucatán, México
jortizla@ipn.mx

Resumen

Actualmente se tiene a disposición una gran variedad de materiales, muchos de los cuales empleamos para resolver las diversas necesidades del quehacer cotidiano. Usamos materiales tan comúnmente que, de manera empírica, hemos aprendido a identificar algunas de las propiedades generales que los caracterizan; así, se sabe que los llamados cerámicos son aislantes eléctricos y térmicos, son frágiles y muy duros. Sin embargo, probablemente no nos hemos detenido a cuestionar más a detalle sobre otros aspectos de estos materiales, tales como su origen, su composición o bien su trascendencia en el desarrollo de diversas tecnologías. Al ocurrir esto, pudiera no percibirse la amplia gama de materia-

les cerámicos que hoy en día existen y que se usan de manera intensiva en aplicaciones que van más allá de las tradicionales.

Este artículo tiene por objetivo ofrecer al lector no especializado en el área de ciencia de materiales una visión general de la presencia e importancia de los cerámicos como materiales tradicionales y de ingeniería, cuyas propiedades únicas permiten aplicaciones diversas, entre las que se incluyen los materiales más modernos diseñados para tecnologías de última generación.

Palabras clave

Materiales cerámicos; biocerámicos; refractarios; cerámica tradicional; cerámica avanzada

Introducción

La palabra “cerámico” proviene del griego antiguo κέραμος (kéramos), cuyo significado es “tierra cocida” o “tierra quemada” y hace referencia a las piezas de barro o arcilla [1-5]. Los cerámicos forman parte de la historia de la humanidad, son materiales que han sido utilizados intensivamente por el ser humano de manera ininterrumpida a través de milenios hasta la actualidad. Prueba de lo anterior son los objetos de cerámica hallados en los vestigios arqueológicos alrededor de todo el mundo y que son probablemente las muestras más antiguas de utensilios y piezas ornamentales que han prevalecido a través del tiempo.

La historia de los cerámicos tiene, presumiblemente, su inicio en la época del Neolítico tardío, al tiempo en que las poblaciones nómadas de cazadores y recolectores se convirtieron en sociedades agrarias, hace unos 12 000 años [5]. Los humanos debieron observar que el material arcilloso mezclado con agua era moldeable y que, además, poseía la capacidad de endurecerse por acción del fuego; propiedades que fueron aprovechadas para fabricar recipientes para el almacenamiento de alimentos y contenedores de líquidos.

En la actualidad, los materiales cerámicos forman parte muy importante de los materiales ingenieriles y sus aplicaciones van desde las más tradicionales, tales como loza de cocina, los recubrimientos de piso o los cementos para construcción, hasta cerámicos avanzados usados en la industria electrónica, aeronáutica y en aplicaciones biomédicas [3-4].

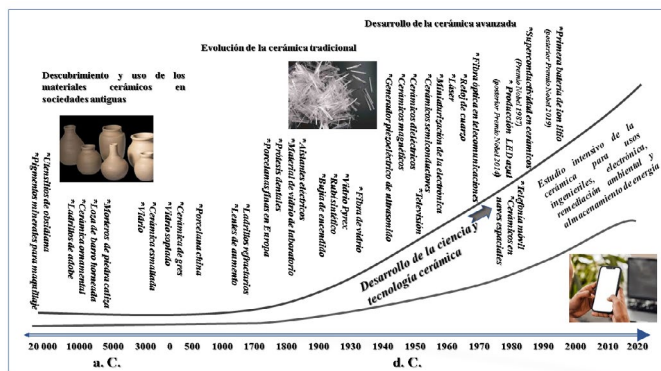
Las propiedades que caracterizan a los materiales cerámicos se relacionan con

su composición y estructura, así como su química de defectos. Por lo anterior, los cerámicos son en su mayoría sólidos cristalinos químicamente inertes, duros, frágiles y estables a altas temperaturas. Además, los especialistas en química y ciencia de materiales pueden sintetizarlos *ad hoc* para promover otras propiedades específicas como son su conductividad iónica, electrónica, propiedades magnéticas y ópticas entre muchas otras. En la figura 1 se presenta una breve descripción sobre la evolución de los cerámicos a través de la historia. Los avances en las distintas subclases de los cerámicos han sido paralelos al desarrollo de las nuevas tecnologías; por ejemplo, en los últimos años, ha surgido gran interés en el diseño de nuevos materiales cerámicos que presentan propiedades eléctricas; estos materiales se denominan electrocerámicos y actualmente se estudian intensivamente para su aplicación en dispositivos de generación y almacenamiento de energía como son el caso de las celdas fotovoltaicas, supercapacitores y baterías [4-5,7].

El presente texto aborda brevemente la definición, clasificación y descripción de la interrelación entre la estructura y propiedades de los cerámicos. Además, está dirigido a lectores no especializados en el tema con el fin de contextualizar la presencia de los cerámicos como materiales de uso cotidiano, ingenieril y su importancia en el desarrollo de tecnologías avanzadas.

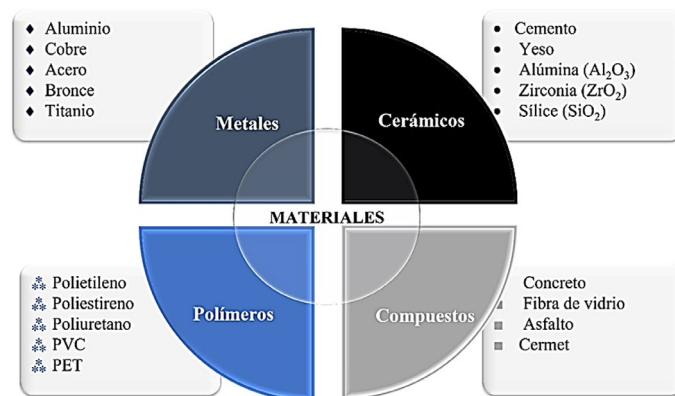
Definición y clasificación de los cerámicos

Los materiales son toda sustancia, ya sea de origen natural o sintético (producido por el ser humano) con propiedades tales que permiten su procesamiento y aplicación para la fabricación de objetos o componentes que



En ciencia y tecnología de los materiales, éstos se agrupan en cuatro grandes categorías; los metales, los polímeros, los cerámicos y los compuestos (materiales que resultan de la combinación física de otros materiales) [8]. La anterior clasificación se basa principalmente en la naturaleza misma de la materia, y entonces, en la composición química y el tipo de enlazamiento interatómico, características que se reflejan en las propiedades generales e intrínsecas de cada tipo de material. En nuestra vida cotidiana estamos rodeados y hacemos uso de utensilios, herramientas y equipos fabricados a partir de diversos materiales y de manera empírica hemos aprendido a

En la figura 2 se muestra la clasificación general de los materiales y algunos ejemplos. Esta clasificación es comúnmente abordada en los libros dedicados a la ciencia y tecnología de materiales ingenieriles.



Los cerámicos, que son el tema de este artículo, constituyen una amplia familia de materiales que incluye los llamados tradicionales, tales como arcillas, cemento, vidrio, porcelanas, losas de piso, etc. Estos cerámicos son obtenidos a partir de materias primas naturales, principalmente aluminosilicatos, compuestos que son muy

abundantes en la corteza terrestre. Por su parte, los cerámicos avanzados presentan composiciones químicas más complejas y son obtenidos por rutas de síntesis y procesamiento especializadas. En este grupo de materiales se encuentran los semiconductores, superconductores y biocerámicos (cerámicos de uso médico) por mencionar solo algunos [4, 7- 10].

Por definición, los cerámicos son compuestos químicos inorgánicos que en su composición combinan elementos metálicos y no metálicos, y de manera general se pueden incluir a los óxidos metálicos, nitruros, boruros y carburos. Otra posible clasificación para los cerámicos es según sus propiedades y aplicación, como se explica a continuación.

Cerámicos estructurales: son materiales obtenidos a partir de polvos refinados o sintéticos y mediante rutas de procesamiento que permiten el control de sus características microestructurales. Se usan en aplicaciones que demandan un desempeño superior, al estar sometidos a esfuerzos mecánicos, abrasión, condiciones extremas de temperatura o ambientes químicos agresivos. Por ejemplo, componentes en turbinas de aeronaves, rodamientos, implantes dentales, intercambiadores de calor o componentes de blindaje [6]. En la figura 3 se muestran pequeñas esferas de zirconia (ZrO_2) que, por sus propiedades de dureza y resistencia a la abrasión, son usadas como medio de molienda para realizar procesos de reducción de tamaño de partícula en molinos de laboratorio.

Cerámicos eléctricos o electrocerámicos: son materiales con propiedades eléctricas, incluyendo aislantes y dieléctricos, mate-



Figura 3. Esferas de zirconia estabilizada con itrio usadas como medio de molienda

riales magnéticos, ferroeléctricos, piroeléctricos, piezoeléctricos, conductores iónicos y mixtos (iónico-electrónicos), semiconductores, superconductores, termoeléctricos, luminiscentes, etc. Se utilizan en muchas aplicaciones tecnológicas tales como sensores, actuadores, dispositivos ópticos y para el almacenamiento de datos [4, 7, 11]. Los electrocerámicos han contribuido de manera significativa a la miniaturización de los dispositivos electrónicos tales como los teléfonos móviles modernos. Los ahora llamados teléfonos inteligentes funcionan con microprocesadores encapsulados con material cerámico, así como decenas de pequeños condensadores y memoria para almacenamiento de datos hechas con cerámicos. En un celular, el micrófono y bocina pueden contener imanes de ferrita, además de micro vibradores piezoeléctricos. Las antenas cerámicas han sido diseñadas con un alto rendimiento en equipos de comunicación inalámbrica; en un celular permiten la recepción de señal y otras funciones como son el bluetooth y GPS (antenas de tipo resonador dieléctrico) [12]. La pantalla está constituida por el llamado Gorilla Glass de Corning, un material vitrocerámico que posee una resistencia mecánica significativa. Además, en las pantallas podemos encontrar el ITO (Indium Thin Oxide), un material transparente y conductor que permite el funcionamiento de la pantalla táctil [13].

Finalmente, las baterías convencionales de ion litio, con las cuales se logró un importante grado de autonomía de los teléfonos móviles, contienen un cátodo hecho a base de óxidos cerámicos. En la figura 4, se ilustran algunos de los diferentes componentes de un teléfono celular moderno, en los cuales está presente el uso de materiales cerámicos.



Figura 4. Presencia de los materiales cerámicos en los componentes de un teléfono móvil moderno

Cerámicos refractarios: Los refractarios son materiales fabricados para aplicaciones que requieren alta temperatura, por ejemplo, en el revestimiento de hornos como aislante térmico o en procesos de manufactura por fundición como medios de filtración de metales fundidos. Algunos ejemplos son la alúmina (Al_2O_3), magnesia (MgO), carburo de silicio (SiC), mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), y otros aluminosilicatos de composiciones específicas los cuales ofrecen propiedades superiores en aplicaciones de igual manera específicas [18, 19]. En la figura 5 se muestran algunas espumas cerámicas fabricadas de SiC , estas piezas

son diseñadas con cierto volumen y tamaño de poros que, aunado a su propiedad de refractariedad, son usadas como medio de filtración de metales fundidos para remover pequeñas impurezas llamadas inclusiones en las piezas metálicas que se fabrican por fundición.



Figura 5. Espumas cerámicas fabricadas con carburo de silicio y usadas como medios de filtración de metales fundidos

Biocerámicos: Son cerámicos desarrollados para su uso médico en los seres humanos con fines de sustitución de tejidos óseos, implantes dentales o como material de relleno. Algunos ejemplos de los biomateriales cerámicos son la Al_2O_3 , ZrO_2 y las porcelanas dentales (que son óxidos bioinertes, término que hace referencia a que el material es inocuo y no produce ninguna reacción al interactuar con el cuerpo humano). Por su parte, los vidrios porosos, la hidroxiapatita y otros fosfatos de calcio son bioactivos [10, 20-22], es decir, inducen una respuesta biológica específica del organismo, por ejemplo, entre el material y el tejido óseo, fomentando su crecimiento.

Cerámicos funcionales: Son materiales avanzados y fabricados “sobre diseño” con características estructurales y microestructurales muy controladas. En esta clasificación pueden también considerarse los estructurales, electrocerámicos, mag-

néticos, refractarios, biocerámicos y todos aquellos diseñados para satisfacer una necesidad específica y que pudieran quedar fuera de los grupos anteriores; por ejemplo, aquellos cerámicos con propiedades térmicas, ópticas o catalíticas.

Estructura de un material cerámico

Aunque los materiales vítreos pueden clasificarse como materiales cerámicos, en este artículo se enfatizará en los sólidos cristalinos, es decir, sólidos que se caracterizan por presentar una disposición periódica, ordenada y repetitiva de sus átomos o iones, formando una red en tres dimensiones a la cual se le denomina estructura de largo alcance. Los cerámicos presentan enlaces formados por la contribución predominante de enlace iónico y en menor medida de enlace covalente [1, 23].

Las principales propiedades de los materiales cerámicos se relacionan con sus características estructurales; es decir, la combinación de enlaces químicos y su química de defectos. El enlace, ya sea predominantemente iónico o covalente, es fuerte, lo que promueve que los sólidos sean químicamente inertes y a menudo estables a altas temperaturas. La alúmina alfa ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), que es el material cerámico ingenieril por excelencia tiene, por ejemplo, un punto de fusión de 2054 °C. Otro ejemplo es la falta de electrones libres que confiere a los cerámicos una conductividad térmica y electrónica deficiente. Por supuesto, los cerámicos avanzados pueden ser diseñados y procesados de manera tal, que las modificaciones estructurales o microestructurales pueden cambiar significativamente sus propiedades. Así, se pueden obtener mediante la correcta incorporación de cationes dopantes en la estructura, materiales cerámicos

semiconductores y conductores iónicos, o bien, mediante un proceso de densificación adecuado, la obtención de cerámicos transparentes a la luz visible.

Retomando la discusión sobre el arreglo estructural de los cerámicos, si se considera que la distribución de los electrones en los iones metálicos que los constituyen es casi esférica y que el enlace interatómico que exhiben, al surgir de fuerzas coulómbicas, es de naturaleza multidireccional. Entonces, la estructura más estable de un compuesto predominantemente iónico tiende a ser aquella en la que un ion obtiene el máximo número de vecinos inmediatos (número de coordinación) de carga opuesta [1, 4, 23]. Tales estructuras exhiben, por tanto, una densidad de empaquetamiento eficiente de los iones que las constituyen. Con base en lo anterior, una forma simple de describir las estructuras ordenadas de los cerámicos es usando un modelo de esferas rígidas, donde se considera que uno de los elementos se encuentra formando un empaquetamiento compacto, del tipo que presentan los metales y que en los huecos remanentes en dicho empaquetamiento se ubica el otro elemento. En la figura 6 se muestra un modelo de la estructura del óxido de cerio o ceria (CeO_2). Su estructura puede describirse como un empaquetamiento cúbico de los iones Ce que ocupan las posiciones de una red llamada cúbica centrada en las caras. En este arreglo, los iones oxígeno se encuentran rodeados por cuatro iones cerio al estar ubicados en los huecos tetraédricos [1,4]. La estructura antes descrita se denomina de tipo fluorita, haciendo referencia al difluoruro de calcio, con fórmula química CaF_2 . Otros materiales que poseen una estructura de este tipo son la zirconia cúbica (c-ZrO_2) y la urania (UO_2).

De manera análoga al tratamiento que se ha hecho para el caso de la estructura tipo fluorita, existen otras estructuras tipo que permiten describir el arreglo atómico de cerámicos con diferentes estequiometrias; por ejemplo, el óxido de magnesio (MgO), óxido de calcio (CaO) y óxido de bario (BaO) presentan una estructura tipo sal de roca, la cual hace referencia a estructura de cloruro de sodio o sal común (NaCl). Finalmente, es importante mencionar al lector no familiarizado con el tema que en el modelo de la figura 6a se pueden visualizar ciertos motivos estructurales que son los poliedros de coordinación que resultan del empaquetamiento de átomos (cationes y aniones) de diferente tamaño; se esquematiza el enlace interatómico y líneas que describen la celda unitaria; además, la relación del tamaño entre los átomos de cerio y oxígeno corresponden a sus radios atómicos. Esta forma de descripción resulta muy didáctica para visualizar la distribución de los átomos en el volumen del material. En este sentido, y para fines comparativos, en la figura 6b, se representa el mismo arreglo estructural de la ceria, pero ahora considerando el radio iónico del Ce^{4+} y O^{2-} .

Propiedades y aplicaciones de los cerámicos

En este punto ya se ha mencionado, al menos de manera cualitativa, las principales propiedades que caracterizan a un cerámico y que lo distinguen claramente de los metales y polímeros: altos puntos de fusión, dureza, refractariedad, etc. Ciertamente, la selección de un cerámico para una determinada aplicación se basa en dichas propiedades (ver tabla 1). Aquí es importante mencionar que las propiedades y desempeño de un material bajo

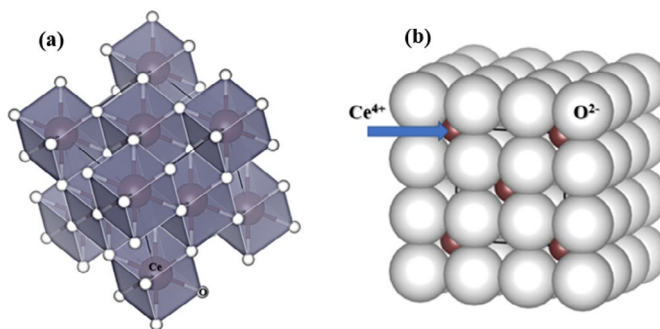


Figura 6. Modelo de la estructura tipo fluorita que presenta el óxido de cerio o ceria

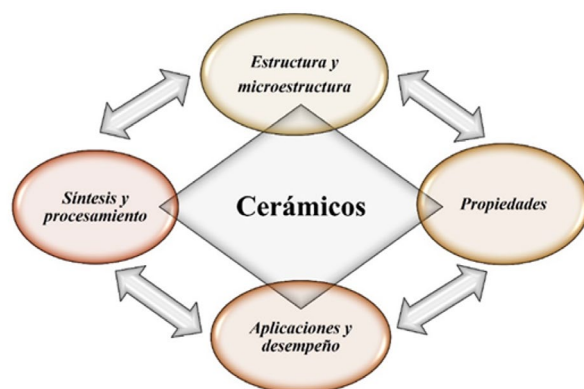


Figura 7. Interrelación entre la estructura, propiedades y desempeño de un material cerámico

condiciones de trabajo específicas se relacionan directamente con su estructura y microestructura, y estas, son a su vez resultado del método de síntesis del material y del procesamiento de la pieza o componente. Es el ingeniero en materiales quien tiene muy en mente esta interrelación (ver figura 7) y quién utiliza diferentes técnicas de síntesis, procesamiento y caracterización para diseñar materiales cerámicos con propiedades optimizadas.

En la tabla 1 se muestran ejemplos de materiales cerámicos agrupados según las clasificaciones previamente mencionadas, además, se mencionan las propiedades específicas que son aprovechadas o bien controladas al sintetizar o procesar cada tipo de material o pieza cerámica para promover su desempeño en aplicaciones específicas.

Clasificación del material		Ejemplos	Aplicaciones diversas	Características o propiedades aprovechables
Cerámicos tradicionales		Arcillas (y otros aluminosilicatos), porcelanas, cerámicos triaxiales.	Piezas ornamentales, piezas artísticas, loza de cocina, muebles de baño, azulejos, otros recubrimientos, cemento, vidrio y materiales de construcción.	Materias primas naturales abundantes o refinadas de bajos costos en comparación con los polvos sintéticos. Se pueden aplicar métodos convencionales de procesamiento cerámico.
Cerámicos avanzados	<i>Estructurales</i>	Al_2O_3 , YSZ, TiN, SiC, Si_3N_4 , diamante.	Abrasivos, recubrimientos duros resistentes al desgaste, herramientas de corte.	Módulo de Young alto, resistencia a la compresión, alta dureza, resistencia a la abrasión, estabilidad térmica, estabilidad química.
	<i>Magnéticos</i>	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, NiFe_2O_4 , $\text{Mn}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{Y}_{2.6}\text{Gd}_{0.34}\text{Fe}_{4.22}$, $\text{Al}_{0.88}\text{Mn}_{0.09}\text{O}_{12}$, ferritas Ni-Zn, ferritas Mn-Zn.	Núcleos de inductores y transformadores, imanes permanentes para sistemas de audio (bocinas), sistemas de almacenamiento de datos.	Capacidad de magnetizarse/desmagnetizarse por influencia de un campo magnético externo aplicado.
	<i>Electrocerámicos</i>	BaTiO_3 , SrTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$, KNbO_3 , LiNbO_3 , BiFeO_3 , $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$, ZrO_2 , óxido de indio y estaño (ITO), SiC, YBaCuO_7 , SnO_2 , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{PbZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ (PZT), SiO_2 , $\text{Ce}_{0.9}\text{Sm}_{0.1}\text{O}_2$	Dispositivos de almacenamiento de datos, almacenamiento de energía (condensadores y baterías), piezoeléctricos, dieléctricos, varistores, semiconductores, membranas, sensores, superconductores, celdas de combustible.	Conducción electrónica, conducción iónica, constante dieléctrica, piezoelectricidad, ferroelectricidad, luminiscencia, termoluminiscencia.
	<i>Refractarios</i>	Aluminosilicatos, Al_2O_3 , SiC, MgO, mullita, Mg_2SiO_4 .	Ladrillos refractarios, cementos colables refractarios, medios filtrantes para metal fundido.	Refractariedad, conductividad térmica, expansión térmica, estabilidad térmica, estabilidad química, puntos de fusión altos ($>900^\circ\text{C}$), resistencia al choque térmico.
	<i>Biocerámico</i>	Al_2O_3 , ZrO_2 , porcelanas dentales, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$.	Tornillos óseos, prótesis de cadera, implantes dentales, cementos biocerámicos.	Bioactividad, biocompatibilidad, densidad, compatibilidad mecánica, resistencia a la corrosión.
	<i>Funcionales</i>	Al_2O_3 , nitruro de aluminio (AlN), vidrio Pyrex, vidrio Corning, zircón (ZrSiO_4), sulfuro de cadmio (CdS), hexaboruro de lantano, (LaB_6) , $\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x(\text{Zr}_2\text{Ti}_{1-x})\text{I}_{x/4}\text{O}_3$ (PLZT), $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Implantes de cadera, Encapsulamiento de circuitos integrados, material de laboratorio, pigmentos, materiales fluorescentes, láser de estado sólido.	Combinación de propiedades que se requieran para una aplicación en particular; pueden ser eléctricas, térmicas, ópticas, magnéticas, mecánicas, etc.

Tabla 1. Ejemplos de materiales cerámicos de acuerdo con su clasificación y usos [3,4-7,13-19, 24]

Finalmente, es importante mencionar que la selección de un cerámico para sus aplicaciones antes citadas (tabla 1) o cualquiera de tantos usos que no han sido mencionados aquí, involucra diferentes criterios. Estos pueden ser de costos, abundancia en la naturaleza, facilidad de procesamiento, pero principalmente, las propiedades que les permiten un desempeño bajo condiciones de operación en las que los metales o polímeros no resultan adecuados. En la figura 8 se muestran valores del módulo de elasticidad (E) y del punto de fusión (T_f) expresados en GPa y $^{\circ}\text{C}$, respectivamente [1, 4, 5, 25]. Las diferencias entre los tres tipos de materiales, cerámicos, metales y polímeros, son evidentes. Puede observarse que en el caso de algunos cerámicos denominados de ultra alta temperatura, como los son los carburos metálicos, los puntos de fusión pueden llegar a superar los 3000°C [6], mientras que para el caso de los polímeros las temperaturas de fusión no rebasan los 300°C . Eso quiere decir que se tiene una diferencia de un orden de magnitud en esta propiedad. Otra diferencia está en los valores del módulo de elasticidad entre cerámicos (200-400 GPa) y metales (40-200 GPa). Ciertamente, los datos usados para la construcción de la gráfica (figura 8) sirven para contrastar las diferencias entre las propiedades de los materiales y no se trata de sugerir que para uno u otro caso pueda utilizarse algún adjetivo de “mejor o peor material”, de hecho, en la ciencia y tecnología de los materiales sería inconveniente e incluso ambiguo hacerlo. Lo que se tiene es una amplia gama de materiales con diversas posibilidades para ser aplicados en la resolución de problemas específicos. Ahora se tiene idea de que, en este contexto, los cerámicos tienen aún mucho por ofrecer.

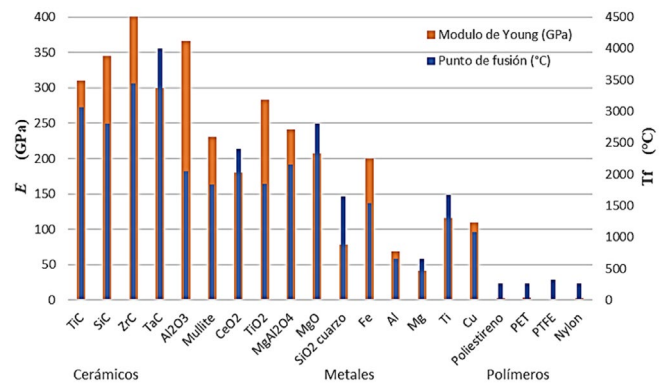


Figura 8. Valores del módulo de elasticidad (E) y del punto de fusión (T_f) de diferentes materiales

Conclusiones

El ser humano ha recorrido un largo camino en el estudio y aplicación de los cerámicos. Son materiales que se han utilizado prácticamente desde el origen de las civilizaciones, en un inicio, para la fabricación de utensilios que le permitieron cubrir necesidades básicas de su vida cotidiana. Actualmente, los desarrollos tecnológicos que involucren el uso de estos materiales incluyen avances tales como la fabricación de dispositivos electrónicos portátiles que permiten las telecomunicaciones, la geolocalización y el almacenamiento masivo de datos de todo tipo. Por ejemplo, sentados en la comodidad de los hogares pueden verse en tiempo real eventos que toman lugar alrededor de todo el mundo o hablar con personas de lugares lejanos. Todo esto ha sido posible gracias a los avances en el campo de los materiales en electrónica, en donde por supuesto se incluyen a los cerámicos. Aunque en un texto tan breve como este es imposible profundizar en mayores detalles sobre sus características y propiedades, es importante identificar su presencia y aporte al modo de vida actual. Los materiales cerámicos se mantienen vigentes y ciertamente su estudio y perfeccionamiento ayudará a resolver proble-

mas emergentes que hoy en día enfrenta la humanidad, como los relacionados con la energía y el medioambiente.

Agradecimientos.

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN) su apoyo mediante los programas SIP-IPN Proyecto No. 20230451, PIAS-IPN, EDI-IPN, BEIFI-IPN y SIBE-IPN. De igual manera se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, otorgado mediante el programa SNI-CONAHCYT.

Referencias

- [1] W. D. Kingery H. K. Bowen, Donald R. Uhlmann. Introduction to Ceramics, 2nd Edition, Wiley, USA, 1976.
- [2] R. E. Hummel. Understanding Materials Science: History, properties and applications, 2nd Edition, Springer, USA, 2004.
- [3] D. W. Richerson. The magic of ceramics, 2nd Edition, Wiley, USA, 2012.
- [4] C. B. Carter, M. G. Norton. Ceramic Materials: Science and Engineering, 2nd Edition Springer, USA, 2013.
- [5] R. B. Heimann, M. Maggetti. Ancient and Historical Ceramics: Materials, Technology, Art, and Culinary Traditions, Schweizerbart Science Publishers, Germany, 2014.
- [6] B. Basu, K. Balani. Advanced Structural Ceramics, Wiley, USA, 2011.
- [7] S. K. Ramasesha. "Science and Technology of Ceramics - Advanced Ceramics: 3. Structural Ceramics and Glasses" Resonance: Journal of Science Education, 5 [2] (2000) 4-11.
- [8] Donald R. Askeland, Wendelin J. Wright. The Science and Engineering of Materials, 7th Edition Cengage Learning, 2016.
- [9] S. K. Ramasesha. "Science and Technology of Ceramics: 1. Traditional Ceramics" Resonance: Journal of Science Education, 4, [8] (1999) 16-24.
- [10] Y. Silva, S. Delvasto. "Características físicas y mecánicas de porcelanas dentales feldespáticas empleando hueso bovino como reemplazo del feldespato" Rev. LatinAm. Metal. Mat. 36 [1] (2016) 61-69.
- [11] S. Banerjee, A.K. Tyagi. Functional Materials: Preparation, Processing and Applications, Elsevier, Ámsterdam, Países Bajos, 2012.
- [12] By Dr. Liji Thomas, Ceramics in Cell Phones, Azom (2019) <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15780>
- [13] B. Rohrig. "Smartphones: Smart Chemistry" Chem-Matters April (2015)10-12.
- [14] S. B. Narang, K. Pubby. "Nickel Spinel Ferrites: A review" Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 519 (2021) 167163.
- [15] A. Vedrtam, K. Kalauni, S. Dubey, A. Kumar. "A comprehensive study on structure, properties, synthesis and characterization of ferrites" AIMS Materials Science, 7 [6] (2020) 800-835.
- [16] N. Kumari, S. Kour, G. Singh, R. K. Sharma. "A brief review on synthesis, properties and applications of ferrites" AIP Conference Proceedings 2220 [1] (2020) 020164.
- [17] S. Arcaro, J. Venturini. Modern Ferrites in Engineering: Synthesis, Processing and Cutting-Edge Applications. Springer, USA (2021).
- [18] C. Sadika, O. Moudden, A. El Bouari, Iz-Eddine El Amrani. "Review on the elaboration and characterization of ceramics refractories based on magnesite and dolomite" Journal of Asian Ceramic Societies 4 (2016) 219-233.
- [19] A. O. Surendranathan. An Introduction to Ceramics and Refractories, CRC Press, USA, 2020.
- [20] L. Sedel "Evolution of Alumina-on-Alumina Implants" Clinical Orthopaedics and Related Research, 379 (2000) 48-54.
- [21] J. Fernández-Monjes, B. M. Maresca, C. Bregni, "Bioce-rámicos: aspectos fármaco-tecnológicos y clínicos de uso odontológico" Revista del Ateneo Argentino de Odontología, LXII [1] (2020)31-38.
- [22] F. Orgaz, J. Rincón, F. Capel. "Materiales biocerámicos y biovidrios" Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr. 26 [1] (1987) 13-19.
- [23] R. J. D. Tilley. Understanding solids: the science of materials. John Wiley & Sons, USA, 2004.
- [24] V. Ruiz-Santoyo, B. A. Andrade-Espinoza, R. Romero-Toledo, L. M. Anaya-Esparza, Z. Villagrán, A. Guerra-Contreras. "Use of Nanostructured Photocatalysts for Dye Degradation: A Review" Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 66[3] (2022) 367-393.
- [25] C. A. Harper. Handbook of ceramics, glasses and diamonds, McGRAW-HILL, USA, 2001.
- [26] J. Binner, M. Porter, B. Baker. "Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs-A review" Int. Mater. Rev. 65 (2020) 389-444.