

CERAMICAS AVANZADAS

Estado actual y perspectivas a nivel mundial*

por

Inés Bernal de Ramírez**

Resumen

Bernal de Ramírez, I.: Cerámicas Avanzadas, estado actual y perspectivas a nivel mundial. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 18 (68): 29-40, 1991. ISSN 0370-3907.

Se presenta información acerca de los materiales cerámicos desarrollados en los últimos años (cerámicas funcionales y estructurales), de sus propiedades, de sus aplicaciones y de sus posibilidades futuras en diferentes campos tecnológicos.

Abstract

The proprieties, uses and possibilities of the recently developed functional and structural ceramics are presented.

El término "CERAMICA" es muy amplio, pues abarca diversidad de productos cuya característica principal es la de ser sólidos, de origen inorgánico no metálico, constituidos por granos aglomerados por un proceso térmico. En este sentido el hombre ha contado con la cerámica desde tiempos remotos para su uso y comodidad, pero sólo hasta hace pocos años, alrededor de 25, se iniciaron investigaciones tendientes a obtener nuevos materiales cerámicos que, si bien responden a la definición anterior, por su origen y metodología de producción, pueden aplicarse a un universo muy diferente al que se aplica la cerámica tradicional.

Los nuevos materiales cerámicos pueden ser clasificados en dos grandes grupos: Funcionales y Estructurales.

* Ponencia presentada en el Seminario sobre el estado actual y perspectiva de los nuevos materiales en Colombia, Bogotá, noviembre de 1990.

** Académica de Número, Profesora Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional.

Las cerámicas funcionales son aquellas que por sus propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas, biológicas o químicas pueden cumplir con éxito las más variadas funciones en distintos campos del quehacer humano.

Las cerámicas estructurales son materiales que por sus propiedades mecánicas y térmicas se proyectan para llenar requerimientos especiales para la construcción de equipos y maquinaria, permitiendo en esta forma el desarrollo de nuevas tecnologías que hasta ahora habían estado limitadas por las características de los materiales existentes.

En las tablas 1 y 2 se presentan algunos de los materiales cerámicos recientemente desarrollados y sus usos más comunes.

CERAMICAS FUNCIONALES

Como se ve en las tablas 1 y 2, en la actualidad se encuentran cerámicas que cumplen con éxito las exigencias de las más variadas funciones en

Tabla 1

Ejemplos de Cerámicas Funcionales*

Características	Materiales	Usos
Propiedades Eléctricas:		
Materiales Aislantes	Alúmina, carburos óxido de berilio óxido de magnesio	Sustratos de circuitos de instalaciones eléctricas y de resistores.
Materiales Ferroeléctricos	Titanatos de estroncio y de bario	Condensadores cerámicos.
Materiales Piezoeléctricos	Circonatos de plomo y titanatos. PLZT, perovskitas, niobatos de litio, cuarzo, cromatos de lantano.	Osciladores eléctricos, impresoras, generadores de chispa.
Materiales Semiconductores y Conductores	Circonia, carburos titanatos y óxidos de metales de transición	Sensores de temperatura, interruptores, eliminación de ruido en instrumentación, alternadores de corriente, calentadores para hornos eléctricos, emisores de rayos infrarrojos.
Propiedades Magnéticas	Ferritas blandas y duras y óxidos de bario y magnesio	Cabezas registradores magnéticas y almacenamiento de datos.
Propiedades Ópticas	Alúmina translúcida Magnesia translúcida Cerámicas translúcidas de $Y_2O_3 - ThO_2$	Lámpara de vapor de sodio. Tubos luminosos y lámparas para aplicaciones especiales Material láser.
Propiedades Biológicas	Alúmina y Apatitas	Dientes artificiales, prótesis, huesos artificiales.
Propiedades Químicas:		
Sensores de Gas	Oxidos de Zinc, hierro y estaño.	Alarmas para fuga de gases, detectores de hidrocarburos.
Sensores de Humedad	Cromato de magnesio y óxido de titanio	Elementos de control en hornos microondas.
Adsorción	Sílice y alúmina multiporosas.	Adsorbentes en biorreactores.
Anticorrosión	Circonia y Alúmina	Reactores de alta temperatura

* Juillard, 1988. Escardino y Amoros 1987.

los campos eléctrico, magnético, biológico y químico, constituyéndose en soportes de las más avanzadas tecnologías.

Electrocerámicas o Cerámicas con Propiedades Eléctricas

En esta familia se han desarrollado materiales que cumplen funciones de aislantes o dieléctricos, ferroeléctricos piezoeléctricos, conductores y su-

perconductores. Examinaremos aspectos de algunos de ellos.

Cerámica dieléctrica (Aislantes o Aisladores)

Un material es dieléctrico cuando no conduce la electricidad. Cuando se aplica un campo eléctrico a él, se causa una separación de alguna extensión de las partículas positivas y negativas de las cuales está constituido el material, es decir, se produce

una polarización del dieléctrico. Cada dieléctrico está caracterizado por dos parámetros que son la permitividad o constante dieléctrica E y la susceptibilidad dieléctrica.

En la industria de energía eléctrica se usa tradicionalmente gran cantidad de materiales aislantes que por ser generalmente componentes de gran tamaño, dan lugar al uso de la cerámica para su construcción porque aunan buenas propiedades y bajo costo.

Un buen aislante eléctrico debe poseer las siguientes propiedades: excelentes características eléctricas, poca absorción de humedad, ser antiinflamable, resistir a la deformación y a la alta temperatura, mucha resistencia mecánica, gran tenacidad y buena resistencia química.

Desde hace muchos años se conoce la propiedad que tiene la porcelana común de aislar la corriente eléctrica; además cumple con éxito las demás condiciones ya que por su composición los cuerpos cerámicos no son combustibles, ni se oxidan, ni desprenden gases a altas temperaturas; además generalmente se usan a temperaturas inferiores a su punto de reblandecimiento y por lo tanto no sufren deformación. A todo esto se añade que conserva sus propiedades dieléctricas a temperaturas

muy altas. Finalmente, como se obtiene con materias primas abundantes en la naturaleza su producción es relativamente barata.

En la actualidad se encuentran materiales aislantes para bajo voltaje y para alto voltaje.

Para bajo voltaje, es decir, aquellos usados en portalámparas, interruptores y aislantes domésticos, se utiliza generalmente una porcelana triaxial ordinaria. La pasta se formula a partir de arcilla, sílice y feldespato pero puede contener fundentes secundarios en pequeña cantidad como cal o magnesita. Los no triaxiales contienen otros componentes como talco, pirofilita o alúmina. El material es algo poroso y barato.

Para alto voltaje se han desarrollado formulaciones de baja porosidad, incluso vidriadas superficialmente, de las cuales las más conocidas son las de tipo magnésico, las de titanio, las de aluminio y las de circon.

Entre las de tipo magnésico son muy comunes las de esteatita, forsterita y cordierita. La esteatita es un material cerámico que tiene como principal materia prima el talco mezclado con arcillas; como fundentes se agregan óxidos alcalinotérreos.

Tabla 2

Ejemplos de Cerámicas Estructurales*

Características	Materiales	Usos
Propiedades Mecánicas:		
Resistencia a altas temperaturas	Nitruros	Turbinas de Gas
Resistencia a la fricción	Alúmina y nitruro de boro.	Motores Diesel
Resistencia al corte	Carburos de titanio y wolfranio, nitruro de titanio y carburo de boro.	Herramientas de corte y partes para trabajo pesado
Lubricantes	Nitruro de boro	Lubricantes sólidos, cojinetes, partes para fricción, sensores de presión.
Propiedades Térmicas:		
Resistencia Térmica	Carburos nitruros y óxido de magnesio	Hornos industriales, maquinaria cerámica.
Aislantes Térmicos	Oxidos de Potasio y titanio, alúmina y circonia.	Hornos industriales, camisas de reactores nucleares.
Conductores Térmicos	Oxido de boro, nitruro de aluminio, alúmina.	Equipo electrónico, elementos radiadores.

* Juillard, 1980.

En ocasiones se emplean como aglutinantes sustancias de tipo orgánico como ceras, gomas o dextrinas. Después de la cocción el cuerpo está formado esencialmente por metasilicato de magnesio ($MgSiO_3$). La forsterita presenta como mineral predominante el ortosilicato de magnesio (Mg_2SiO_4). Cada material tiene sus aplicaciones correspondientes. La cordierita además de tener alta constante dieléctrica, tiene un coeficiente de dilatación térmica extraordinariamente bajo.

Las cerámicas con base en el dióxido de titanio y los titanatos tienen alta constante dieléctrica y se usan en la construcción de condensadores de gran capacidad en poco espacio.

Las porcelanas de circón y de alúmina inventadas durante la Segunda Guerra Mundial fueron inicialmente utilizadas para la obtención de porcelanas aislantes de alta frecuencia. Las de circón presentan ventajas que las hacen útiles para las soldaduras vidrio-metal-cerámica y las de alúmina, por su excelente resistencia mecánica al impacto y a la flexión, se usan en aisladores expuestos a choque mecánico o cuando se necesitan secciones transversales pequeñas. (Kirk Othmer, 1963).

Otra porcelana que ha sido utilizada como aislador es la porcelana lítica cuyo componente principal el espodumeto Beta ($Li_2Al_2Si_4O_{12}$); presenta muy pequeña dilatación térmica. En el grupo de los dieléctricos de baja pérdida se usa también un material fabricado a partir del mineral Wollastonita $CaSiO_3$, el cual se puede obtener a temperaturas menores que las de la esteatita y el circón y presenta buena resistencia mecánica.

Dieléctricos Polares

En estos materiales cuando se aplica un campo eléctrico se afecta en alguna forma la distribución de las cargas positivas y negativas inherentes a su estructura cristalina, es decir, se produce una polarización. Esto se debe a que la estructura cristalina contiene un eje único a lo largo del cual existirá un momento dipolar eléctrico. Estos cristales mostrarán fenómenos de piroelectricidad y piezoelectricidad. La piroelectricidad es la liberación de una carga eléctrica cuando se cambia la temperatura y la piezoelectricidad es la liberación de electricidad por aplicación de una fuerza.

Materiales Ferroeléctricos

Se consideran materiales ferroeléctricos aquellos que sufren una inversión en la dirección de polarización cuando se les aplica un campo eléctrico suficientemente grande. Los ferroeléctricos son un subconjunto del conjunto de los piroeléctricos, es decir, que todos los ferroeléctricos son piroeléctricos pero no todos los piroeléctricos son ferroeléctricos. (Whatmore 1988).

Según Bowen (1986) las cerámicas ferroeléctricas poseen una distribución desigual de cargas en

sus celdillas unitarias y los granos cristalinos se polarizan es decir, una parte del grano se carga positivamente mientras que la otra lo hace negativamente. La cerámica no muestra polarización neta puesto que los granos están orientados al azar anulando las cargas entre sí. Sin embargo, por aplicación de un campo eléctrico externo durante el procesado, los granos pueden reorientarse de forma que las direcciones de las polarizaciones se fortalezcan y confieran al material una distribución de carga macroscópicamente detectable. La cerámica permanece no conductora incluso cuando está polarizada. Esta propiedad es la que se explota en la fabricación de condensadores que acumulan carga eléctrica y por esta razón los mismos se fabrican principalmente con cerámicas. Las más conocidas son las de titanatos de bario y estroncio y el titanato circonato de plomo.

Materiales Piezoelectricos

Son materiales que sufren deformación mecánica al ser sometidos a un campo eléctrico. Bowen (1986) atribuye este fenómeno a que la distribución de cargas de un cristal de una cerámica ferroeléctrica no es simétrica con respecto al centro del cristal y se produce un cambio de polaridad por deformación de este. A su vez, cuando la cerámica piezoelectrica se deforma mecánicamente, genera una considerable carga eléctrica y por esta razón los materiales piezoelectricos son hábiles transformadores de energía eléctrica en mecánica y viceversa, propiedad que los ha hecho muy útiles en modernas instalaciones que cubren campos en la electrónica como vibradores, osciladores, filtros, en los sistemas de sonar y en los equipos de ultrasonido. Su propiedad de generar cargas eléctricas se aprovecha para generación de chispa en calentadores, cocinas y mecheros de gas.

Esta propiedad aparece en el caso de la familia de la perovskita $CaTiO_3$ y otros compuestos como el Pb_2FeNbO_6 . Una de las aplicaciones más comunes en la actualidad ocurre en los sistemas de impresión de alta resolución por chorro de tinta, en los cuales un ducto diminuto para la tinta, construido en cerámica piezoelectrica, induce el paso de la tinta por contracción bajo el impulso de una corriente eléctrica. Así están construidas las cabezas de inyección de tinta de imprenta de las multicopiadoras de alta precisión, las que por aplicación selectiva de voltaje se contraen repentinamente liberando tinta sobre el papel.

Otros tipos de cerámica ferroeléctricas tales como la llamada PLZT (por las iniciales de plomo, lantano circonio y titanato) pueden reaccionar por efecto de excitación con fotones de luz, por lo que son usadas en opto-electrónica.

Materiales semiconductores y conductores

Las propiedades eléctricas tales como la conductividad y su recíproca, la resistividad, definen las respuestas al estímulo de un campo eléctrico.

Las estructuras caóticas de las cerámicas tradicionales les conferían una gran resistividad y por eso se usaban generalmente como aislantes de la corriente eléctrica. Sin embargo, el conocimiento de que las estructuras ordenadas de tipo cristalino permiten que los electrones, debidamente excitados, viajen a través de la red, se ha combinado con los nuevos métodos de procesamiento que permiten obtener productos cerámicos con alta perfección estructural, para producir cerámicas semiconductoras. Son comunes las fórmulas con base en titanato, de bario, carburo de silicio, mezclas de óxidos de bismuto y zinc y óxido de vanadio que encuentran alta aplicación como termistores y varistores o resistores variables. Se encuentran como detectores de temperatura, elementos calefactores, sensores térmicos y detectores de radiación infrarroja.

Los óxidos de cobalto y vanadio actúan como semiconductores a bajas temperaturas pero el de vanadio sufre una ligera modificación en su estructura alrededor de los 330°K que le convierten en conductor. El óxido de renio presenta propiedad de conductor semejante a los metales, independientemente de la temperatura de uso.

Algunos como el óxido de zinc son semiconductores si se incluyen ciertas impurezas en su estructura cristalina, proceso que recibe el nombre de "dopado". Incluido este material en una matriz cerámica aislante se puede obtener un producto que a bajo voltaje muestra baja conductividad y a alto voltaje es altamente conductor; el mismo recibe el nombre de varistor o resistor variable. El voltaje límite se puede regular variando la microestructura, es decir el tamaño del grano y la anchura de las capas aislantes entre granos.

Existen otros conductores de tipo iónico como los formulados con base en óxido de circonio o beta alúmina que constituyen el corazón de los electrolitos sólidos ampliamente usados en baterías y en sensores.

La Cerámica del futuro. Los superconductores

La superconductividad, es decir, la propiedad que tienen algunas sustancias de conducir la energía eléctrica prácticamente sin resistencia, fue conocida desde 1911, pero fue sólo hasta 1950 cuando los científicos mostraron que la teoría de la superconductividad debe tener en cuenta las propiedades térmicas de los materiales que la exhiben. Hasta el año de 1987 se obtenía superconductividad en determinadas sustancias sometidas a enfriamiento cercano al cero absoluto (-273°C) por acción del helio líquido. En 1987 el científico Paul Chu de la Universidad de Houston, anunció que una cerámica de óxido de itrio-bario y cobre mostraba superconductividad a 94°K (-179°C), temperatura que fácilmente se alcanza utilizando nitrógeno líquido el cual ebulle a 77°K y es mucho más abundante y barato que el helio líquido. La investigación de esos años se dirigía a obtener materiales supercon-

ductores a temperaturas cada vez más altas lo cual se ha logrado con cerámicas de óxido de cobre con bismuto o talio los cuales se obtienen a temperaturas de 125°K . Los llamados superconductores 1-2-3 tienen una estructura semejante a la perovskita. (Ver figura 1) que se puede visualizar como cubos con un átomo de un metal grande como itrio o bario en el centro del cubo y metales pequeños como cobre en las esquinas. Las aristas de los cubos contienen átomos de oxígeno alrededor del itrio y bario.

¿Por qué han tenido tanto impacto económico las cerámicas superconductoras?

Los superconductores se han usado desde hace varios años en los equipos llamados escanógrafos (exploradores de cuerpos), así como en los equipos de resonancia nuclear magnética para investigación. Sin embargo, los superconductores usados en ellos necesitaban temperaturas de 24°K o menores las cuales necesitaban helio o hidrógeno líquidos, materiales escasos y costosos.

Pero al obtener superconductores a mayores temperaturas, por ejemplo a más de 77°K , temperatura de ebullición del nitrógeno, los superconductores salen más baratos. Así, ahora se están investigando para construir, magnetos más poderosos como los utilizados en el tren "maglev" del Japón que como su nombre lo indica se desplaza sin rozamiento sobre los rieles debido a la fuerza magnética que lo mantiene levitando sobre ellos.

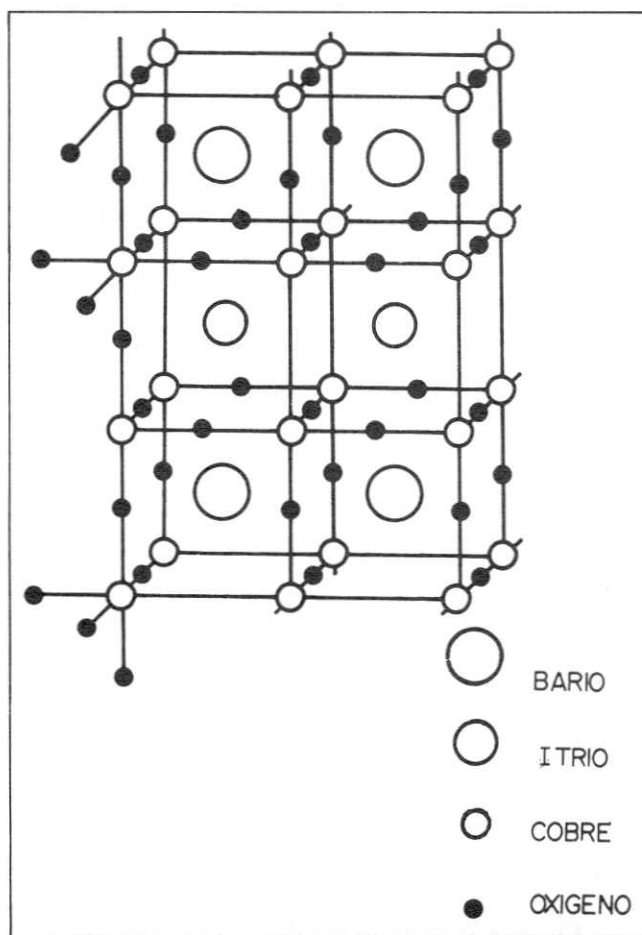


Figura 1. Estructura de la Perovskita

Además en aplicaciones más sencillas ya se está aplicando la superconductividad para detectar diminutos cambios en campos magnéticos y en corrientes eléctricas, con amplias aplicaciones en detectores de cambios físicos como temperatura y humedad y en las memorias de los computadores con una capacidad de almacenamiento mucho mayor de las que existían hasta hace poco tiempo. La ventaja de que no presenten resistencia, minimiza la generación de calor y el consumo de potencia en comparación con los computadores tradicionales. También prometen alta eficiencia en la conducción de energía eléctrica.

El mayor problema que se presenta en el uso de los materiales cerámicos superconductores, deriva de sus propiedades mecánicas pues existe el problema de cómo producir alambres flexibles o láminas delgadas con este tipo de materiales, otro problema por resolver, es cómo hacer contactos eléctricos adecuados entre los óxidos cerámicos y los alambres metálicos convencionales. Además, como conductores de electricidad los materiales cerámicos muestran aún bajas capacidades en comparación con los metales tradicionales como el cobre. Se espera que en un futuro cercano la investigación en el campo de las cerámicas superconductoras logre avances significativos aun cuando las predicciones indican que nunca podrán fabricarse materiales que exhiban estas propiedades a la temperatura ambiente, ni aún a 0°C (273°K).

Biocerámicas o Cerámicas con propiedades biológicas

La más antigua de estas es la porcelana dental. Se tiene noticia de su existencia desde principios de este siglo, cuando se inició su aplicación para restauraciones dentales que daban buenos resultados tanto por su resistencia como por sus condiciones estéticas.

Estas porcelanas se componen de mezclas de caolín feldespato y cuarzo con fundentes tales como carbonatos alcalinos o alcalino térreos, borax o ácido bórico según el punto de fusión esperado.

En la actualidad se ha ampliado la utilización de porcelana a la producción de huesos artificiales dando por resultado materiales que puedan ser implantados directamente y no produzcan rechazo por los tejidos del paciente, lográndose en algunos casos, materiales tan semejantes a los tejidos óseos que asimilan los tejidos fisiológicos que los rodean. Otros materiales que se están usando actualmente son la implantación cerámica de alumina y el llamado 'biovidrio de hidroxiapatito'.

Otros usos

Aplicaciones magnéticas (Wood 1988)

En esta década se ha desarrollado la tecnología de solidificación rápida y laminación por rodi-

llos, que ha permitido la obtención de materiales magnéticos permanentes basados en Fe-Nd-B. Los magnetos pueden hacerse mezclando el polvo obtenido con resinas epóxicas para poderlo moldear y darle la forma deseada. Con este material se pueden producir magnetos muy pequeños cuyas limitaciones son la temperatura de uso, (pues su temperatura Curie está alrededor de 140°C) y poca resistencia a la corrosión.

Otras aplicaciones (Colin Leach 1987)

Propiedades químicas: Desde hace aproximadamente 20 años se ha perfeccionado la pila de sodio-azufre que funciona a 300°C y se basa en la rápida conductividad iónica de electrolitos cerámicos de B/B Al_2O_3 . Otras fuentes conocidas se basan en sales de Litio.

Como soporte de catalizadores se utilizan materiales cerámicos de cordierita y vidrio, fabricados en forma alveolar con una gran superficie específica de absorción especialmente de gases utilizados ya en la industria automotriz. Finalmente son conocidos los detectores cerámicos para supervisar la eficacia del proceso de combustión y la emanación de gases de escape mediante la medición del índice de oxígeno.

CERAMICAS ESTRUCTURALES

Según Escardino y Amoros (1987), las nuevas cerámicas estructurales presentan las siguientes ventajas frente a los metales a los que pretenden sustituir:

- Mayor refractariedad, es decir, mayor resistencia a la temperatura.
- Superior resistencia mecánica, especialmente a temperaturas elevadas.
- Mayor dureza superficial y por tanto mejor resistencia al desgaste por razonamiento.
- Menor conductividad térmica y por ello mejores características como aislante térmico.
- Menor densidad por lo que permiten elaborar componentes y piezas muy ligeras.
- Mayor resistencia a la corrosión y al ataque químico.

Las desventajas frente a los mismos materiales son:

- Fragilidad y escasa resistencia al choque mecánico.
- Menor resistencia al choque térmico.
- Mayor dificultad para obtener determinadas geometrías complejas con la precisión necesaria.

Además en esta familia y por las aplicaciones que tienen, podemos incluir los materiales compuestos, definidos por Juillard (1988) como "sólidos hechos por dos o más constituyentes, los cuales, cuando se reúnen adquieren propiedades que separadamente no poseen".

Para la producción de estos materiales cerámicos se ha abandonado la arcilla como materia prima de origen, reemplazándola por diversos compuestos inorgánicos de alta pureza como óxidos metálicos, carburos, nitruros, titanatos, circonatos etc., los cuales se someten a procesos de elaboración más sofisticados como prensado isostático en frío o en caliente, deposición de vapores etc., que permiten manipular físicamente la microestructura del producto para obtener las características que se desean en él.

Estos tipos de material cerámico llamados *termocerámica*, poseen alta resistencia a choques mecánicos y térmicos, muy buena resistencia a altas temperaturas y a la corrosión bajo severas condiciones climáticas. Además son menos densos que los modernos aceros de tal forma que su uso en motores de automóviles o de aviones reduce considerablemente el peso del motor lo cual se refleja en economía de combustible.

En sistemas enfriadores pueden utilizarse partes cerámicas gracias a que algunas presentan excelentes conductividades térmicas que se aprovechan para eliminar calor rápidamente. Esta propiedad se está usando por ejemplo en las cubiertas de óxido de aluminio o nitruro que conducen rápidamente el calor fuera de los circuitos.

Los miembros más antiguos de esta familia son las cerámicas metálicas que se desarrollaron con el objetivo de obtener un material que combinara la buena resistencia mecánica y a la corrosión que presentan los óxidos metálicos, con la excelente ductibilidad y resistencia al choque térmico de los metales.

El desarrollo de estos productos se inició en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial donde se investigaban nuevos materiales que sustituyeran las aleaciones metálicas que escaseaban como las de níquel, cobalto y cromo para aplicarlas a las turbinas de gas, donde el material debe presentar gran resistencia mecánica y alta resistencia a la corrosión a altas temperaturas.

La investigación posterior se ha encaminado hacia el desarrollo de nuevos materiales refractarios con propiedades mecánicas y químicas a altas temperaturas.

Los carburos, nitruros, boruros y siliciuros de algunos metales de transición presentan conductividades térmicas y eléctricas del mismo orden de magnitud que los metales pero son frágiles y su resistencia al choque térmico, aunque superior a la de

otros óxidos, es baja en comparación con los metales. Muchos de estos materiales duros y de alto punto de fusión resisten a la corrosión y pueden sintetizarse en presencia de metales para producir materiales de resistencia muy alta a temperaturas elevadas.

De ahí nació la idea de producir refractarios cerámicos cementados con metal los cuales recibieron el nombre de "CERMETS".

La investigación sobre los materiales obtenidos que se orientó hacia la consecución de otros materiales con mayor ductilidad y resistencia al choque mecánico por modificación de su estructura, desembocó en la producción de diferentes materiales que están contribuyendo a la revolución tecnológica actual; la industria aeroespacial y los motores de combustión en automóviles y aviones son ejemplos de aparatos que han sido beneficiados por los avances de la nueva cerámica en los últimos 30 años y es de prever que la cerámica se tendrá en gran estima en las tecnologías del siglo XXI y que prácticamente se está iniciando una nueva era, la era de los materiales cerámicos por pedido y de los compuestos.

Wood (1988) afirma que los avances en la investigación tecnológica para producir nuevos materiales por diseño han invertido la forma de actuar de los ingenieros. Antes se diseñaba y producía con los materiales con que se contaba, ajustando el producto al material y fijando las especificaciones de garantía para su uso, con lo cual muchos inventos quedaron sólo en el papel, ya que no se contaba con los materiales apropiados para realizarlos. En la actualidad la investigación se dirige a diseñar el material que debe cumplir las especificaciones y ya se han logrado materiales que poco a poco se están introduciendo en diferentes tecnologías, de los cuales se mencionan los más conocidos:

Cerámicas con fragilidad reducida

El mayor problema de la cerámica es su fragilidad y por eso la investigación ha desarrollado materiales en los cuales se añaden fibrillas a la matriz, que esencialmente tienen por objeto evitar que los poros, que difícilmente se pueden remover en el proceso de cocción, se propaguen por un impacto y causen la fractura del objeto. Las mezclas de fibras y matriz cerámica son numerosas y por eso se tratan algunas de ellas.

Carburo de silicio reforzado con alúmina: contiene alrededor del 40% de fibras, tiene una resistencia a la fractura de 616 MPa a 1.200°C y una dureza de 8.7 MPa m^{-3/2}. Este último valor no es muy alto pero es cerca del doble del de la alúmina pura a temperatura ambiente (Wood 1988).

Otro ejemplo conocido es el compuesto de carbón-carbón que tiene una densidad de sólo 1.38 y se ha probado hasta una temperatura de 3.000°C.

Las fibras de carbón se recubren con una cerámica para proteger el compuesto C—C de la oxidación en servicio. La temperatura de operación está limitada por la cubierta cerámica, por ejemplo: una cubierta de nitruro de silicio puede ser empleada hasta 1.200°C. y una de carburo de silicio hasta 1.760°C.

Materiales para motores

Según Colin Leach (1987) las cerámicas refractarias de gran rendimiento, capaces de soportar las duras condiciones del medio, brindan a los proyectistas de motores la posibilidad de aumentar el rendimiento al permitir temperaturas de funcionamiento más elevadas y reducen las pérdidas térmicas, mecánicas e inerciales.

También es posible incrementar la eficacia de la combustión mediante la utilización de mecanismos de sobrealimentación acoplados a sensores cerámicos en contacto con los gases de escape. Los convertidores catalíticos empleados para la regulación de estos gases consisten, por lo general, en un sustrato cerámico alveolar de gran superficie sobre el cual se aplica el catalizador.

Los elementos de cerámica de un motor de automóvil tendrán que funcionar en un ambiente hostil, sometidos a la acción de fluidos corrosivos. En el curso de su vida habrán de ser capaces de tolerar, sin falta, gradientes y fluctuaciones cíclicas de temperaturas extremas junto con los termoesfuerzos que eso conlleva. Además, las propiedades de resistencia al desgaste del material cerámico deberán ser aceptables para la aplicación propuesta y en esto son muy importantes los desarrollos que permiten disminuir su fragilidad.

El uso de estos materiales se justifica cuando representan reducciones del costo con mayor rendimiento frente al combustible. Se está logrando este propósito al poderse utilizar temperaturas más elevadas, gracias al revestimiento refractario de la cámara de combustión y a la menor fricción que ocurre por emplearse superficies de contacto cerámico. Además, estas piezas presentan las siguientes ventajas: resistencia al desgaste, termoaislamiento, buenas propiedades eléctricas e inercia química.

Colin Leach (1987) propone clasificar los materiales para esta aplicación en tres grupos: Monolíticos, Compuestos y de Revestimiento.

Monolíticos: Se agrupan aquí materiales cerámicos de Si₃ N₄, SiC, Al₂ O₃ y Si Al O N y Circonia, suavizados con magnesia, calcia o ceria. El sistema ceria-circona es de especial interés porque el material cerámico producido posee una tenacidad a la fractura de más de 25 MPa m, mientras que en otros sistemas de circona se ha observado que esta tenacidad es de aproximadamente 10 MPa m.

La cerámica de Si₃ N₄ se usa en componentes sometidos a esfuerzos a temperaturas por encima

de 1.200°C. con muy pequeños coeficientes de termodilatación presentando mejores propiedades que algunas aleaciones metálicas convencionales usadas en rotores de turbo-compresores.

Los materiales de circona son más apropiados para uso a temperaturas inferiores a 800°C. Su coeficiente de termodilatación es similar al del hierro fundido.

Compuestos: Como ya se indicó, debido a la naturaleza quebradiza de los materiales cerámicos de gran resistencia, se han desarrollado tecnologías de producción de compuestos que utilizan fibras de alúmina, sílice o carbón para refuerzo de los materiales donde ésta propiedad deba controlarse.

De Revestimiento: Se está estudiando la posibilidad de emplear revestimientos cerámicos, a manera de barreras térmicas sobre piezas metálicas que trabajen en ambientes de alta temperatura como cámaras de combustión y ductos de escape. Con ello se podrá aumentar la temperatura de funcionamiento y la eficiencia del combustible. Para ello se está utilizando circona en polvo, suavizada con itria o calcia con un revestimiento ligante que se aplica directamente al sustrato. En este proceso es necesario conseguir un revestimiento uniforme y evitar la fractura debida a esfuerzos de compresión superficiales y mala ligazón.

Por qué surgieron estos materiales y ¿cuál es su estado actual de desarrollo en el mundo? Inicialmente fueron los Estados Unidos y el Japón las potencias que emprendieron investigaciones tendientes a obtener materiales que pudieran responder a las exigencias del mundo tecnológico e impulsados por varias circunstancias históricas: por ejemplo la crisis energética de la década de los setenta puso a pensar en materiales que en una u otra forma contribuyeran en el ahorro de energía en los procesos donde se pudieran aplicar. Con este fin se logró en primera instancia mejorar las propiedades de muchos metales tradicionales produciendo las llamadas super aleaciones; luego se lograron crear nuevos materiales combinando la teoría sobre las relaciones entre la estructura, propiedades y comportamiento y la manera en que estas interacciones mutuas se ven afectadas por el proceso de elaboración.

En los Estados Unidos la investigación y desarrollo de las cerámicas técnicas actualmente está soportada por empresas multinacionales que pretenden sustituir productos tradicionales por otros construidos en cerámica. Esta motivación surgió inicialmente en los programas estatales para la defensa y para la tecnología espacial quienes orientaron la investigación hacia la obtención de materiales que sustituyeran con éxito a los metales permitiendo resolver los problemas que estos presentan frente al choque térmico, abrasión por altas velocidades, calentamiento por rozamiento y exceso de peso, entre otros. Las nuevas cerámicas y los compuestos se multiplican año tras año pues sus aplica-

ciones se orientan ahora hacia la sustitución de materiales para la construcción de motores, turbinas, partes de frenos para aeroplanos etc.

En cuanto a materiales de cerámica funcional existen grupos interdisciplinarios de investigación en universidades estatales como las de Carolina del Norte, California y Pensilvania quienes están tras la creación de nuevos materiales semiconductores electrónicos de alta eficiencia o para aplicaciones ópticas para usos diversos, así como nuevos y revolucionarios piezoeléctricos, algunos de los cuales están en vías de utilizarse por ejemplo en sistemas de computación. Se sabe que la firma IBM emplea actualmente alrededor de 400 especialistas en cerámica y que recluta más cada año.

En cuanto a desarrollo de nuevos métodos se están estudiando los referentes a formas de preparación de polvos y fibras, así como nuevos procesos de moldeo; estos estudios se están llevando a cabo principalmente en el Laboratorio de Investigaciones Navales del Departamento de Defensa, el centro para el proceso de evaluación de metales, matrices cerámicas y compuestos del Instituto de Tecnología de Masachussetts (MIT), el centro de producción de compuestos en Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Delaware y el laboratorio de altas temperaturas del Laboratorio Nacional Oak Ridge.

El Japón es en la actualidad el mayor productor y consumidor de cerámica técnica, lo cual se explica por el amplio mercado de los productos japoneses tanto electrónicos como automotores. La investigación llevada a cabo en diferentes centros tanto en el Japón como en los Estados Unidos agrupa especialistas químicos, físicos e ingenieros de las más diversas disciplinas para desarrollar conjuntamente las nuevas tecnologías.

Como ejemplos de desarrollo en el Japón se pueden citar los productos para motores de combustión cerámicos, bujías de encendido, turbinas, cámaras de precombustión, turbocompresores y colectores de escape, producidos por las compañías Kiocera y NGK, algunos de los cuales han sido incorporados en la producción de automotores por las compañías Izuzu, Toyota, Nissan y Mazda. La industria electrónica ha conducido la revolución de la miniauturización en el mundo, gracias en buena parte al desarrollo de la gran familia de las cerámicas funcionales; el conjunto de componentes como preamplificadores, ecualizadores, sintonizadores, materiales de conexión de chips etc., brindan la posibilidad de múltiples aparatos portátiles que en muchos casos llevan incorporada su propia fuente de energía, también cerámica.

En años recientes, la Comunidad Económica Europea (CEE), decidió unir sus esfuerzos para desarrollar sus propios materiales en un intento de independizar su desarrollo de las otras potencias, y basándose en la independencia técnica y científica, promover la defensa económica del continente eu-

ropeo. Con este fin se creó el Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas, organismo que fomenta la participación de la industria en la financiación de la labor investigativa en las universidades, mediante la concesión de becas y subvenciones para investigación. Además se crearon dos programas directrices llamados Euram y Eureka.

El programa Euram pretende estimular a los países europeos para que investiguen y produzcan piezas cerámicas para motores de combustión interna de altas temperaturas y compuestos con diferentes tipos de matriz para usos en aviación y biomédicos. El presupuesto inicial fue de 30 millones de eurodólares pero ha crecido en los últimos años.

El programa Eureka lanzado por el presidente Mitterand en 1985, comprende 165 proyectos adelantados conjuntamente por 19 países, algunos de los cuales se refieren al desarrollo de nuevos materiales cerámicos; los fondos de este proyecto en 1987 se acercaban a 4.3 mil millones de eurodólares. Algunos de los proyectos involucrados en este programa se refieren a la obtención de nuevos precursores cerámicos, al diseño y nuevos procesos de producción de partes para motores diesel, producción de turbinas de bajo rendimiento, motores para aeroplanos de mediano poder y estudio para seleccionar los nuevos materiales que aseguren la mejor carrocería y funcionalidad con la mayor economía energética en el automóvil del futuro. Además de estos programas, numerosas industrias han iniciado sus propios desarrollos en el Reino Unido, Alemania y Suiza.

En el Reino Unido las actividades de investigación y desarrollo son muy extensas y están coordinadas en colaboración con el Ministerio de Industria y Comercio y realizadas principalmente por tres consorcios: el Club de Cerámica del Reino Unido, Cerámica avanzada para turbinas, que inició labores desde 1984 y Aplicaciones cerámicas en motores alternativos, establecido en 1986 para resolver problemas relativos al desarrollo de repuestos para motores ya existentes, proyección de turbocompresores y aislamiento de cámaras de combustión.

El Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas (SERC) patrocina en el Imperial College de Londres estudios sobre preparación de polvos, caracterización de procesos y microestructuras de materiales cerámicos industriales de circonita, alúmina y vidrio, junto con el desarrollo de electrolitos sólidos para aplicaciones electroquímicas. Todos estos estudios reciben también apoyo de las industrias.

Desde 1988 la industria Carborundum Resistant Materials de Inglaterra produce una diversa gama de tejidos bajo la marca Fibersil, los cuales han encontrado aplicación en vehículos, barcos, hornos industriales, maquinaria agrícola y en fin, donde quiera se necesiten materiales no combustibles de estas características.

La Subsidiaria alemana de Carborundum está produciendo cuerpos de bombas para agua para la industria automotriz, construidas en carburo de silicio y diversos productos refractarios y de fibra cerámica bajo la marca Hexoloy. En Alemania se facturaron 700 millones de francos en 1987 en sólo cerámicas técnicas cuya industria empleaba en ese año 8.000 personas.

En Suiza la Escuela Politécnica Federal de Lausana está desarrollando el programa denominado "Materiales para las necesidades del mañana", financiado por la Fundación Nacional Suiza para la Investigación Científica dentro del cual se están diseñando novedosos compuestos como el recientemente informado con base en el sistema Al-Ti (Zr) O-N. También en este país se están desarrollando sistemas y materiales aplicados a la industria de motores.

Finalmente se puede hacer referencia a la investigación en el área soviética de la cual se conocen desarrollos desde hace más de 20 años en la preparación de materias primas como polvos cerámicos y productos tales como óxidos complejos para electrónica, aisladores de alta temperatura, soportes catalíticos y catalizadores. Han desarrollado alta productividad y calidad utilizando el proceso llamado "Síntesis autopropagada a alta temperatura", el cual sólo se conoció recientemente en los Estados Unidos.

En la tabla 3 se resumen algunos de los logros obtenidos en la Industria Automotriz.

Aplicaciones Aeroespaciales (Wood 1988)

La investigación en este campo se ha dirigido a obtener compuestos que puedan operar a temperaturas superiores a 1.200°C. Por algunos años se emplearon compuestos con base en resinas que contenían fibras inorgánicas, ahora se están empleando matrices metálicas, cerámicas de vidrio y aún de carbón.

Para envolturas se está desarrollando un compuesto de aluminio y carburo de silicio con el cual se puede mediante aspersión crear una capa líquida sobre el sustrato dando lugar a una película protectora.

Para discos de turbina y materiales para aletas donde los requerimientos son más exigentes se están investigando cerámicas de titanio, de carbón y algunas de TiAl y Ti₃. (Proceso Osprey). También para componentes de turbinas se están produciendo compuestos de carburo de silicio reforzado con alúmina conteniendo un 40% de fibras, las cuales muestran como ya se dijo, resistencia a la fractura de 610 M Pa a 1.200°C. y dureza de 8.7 M Pa. M -3/2.

En la industria aeroespacial los compuestos carbón-carbón a los que ya se había hecho referen-

Tabla 3

Programa Automóvil del Futuro		
País	Fábrica/Modelo	Innovación
Japón	Isuzu/Aska	Bujías de encendido en la parte inferior de la cámara de precombustión diesel.
	Toyota/Crown (1984)	Idem.
	Nissan/Fairlady (1985)	Motor diesel con brazo rotor turbocompresor. Turbina de Ni Si. Menos peso, resistencia a la temperatura hasta 900°C. aceleración más rápida y ahorro de aceite.
Francia	Mazda/Galant (1986)	Cámara ceramizada de precombustión, Pistones, coronas de pistones y cabezas de cilindros.
	Mitsubishi	Motor con partes cerámicas.
	Renault	Idem.
Reino Unido	Peugeot Spa.	Idem.
	Rolls Royce	Turbinas
	Leyland Ford	Motores Diesel Motores Diesel
Estados Unidos	Ford/Scort	Cámaras de precombustión (Mazda). Linx Idem
	Alemania	Porsche/Turbo 944S (1984)

cia muestran una baja densidad y alta refractariedad.

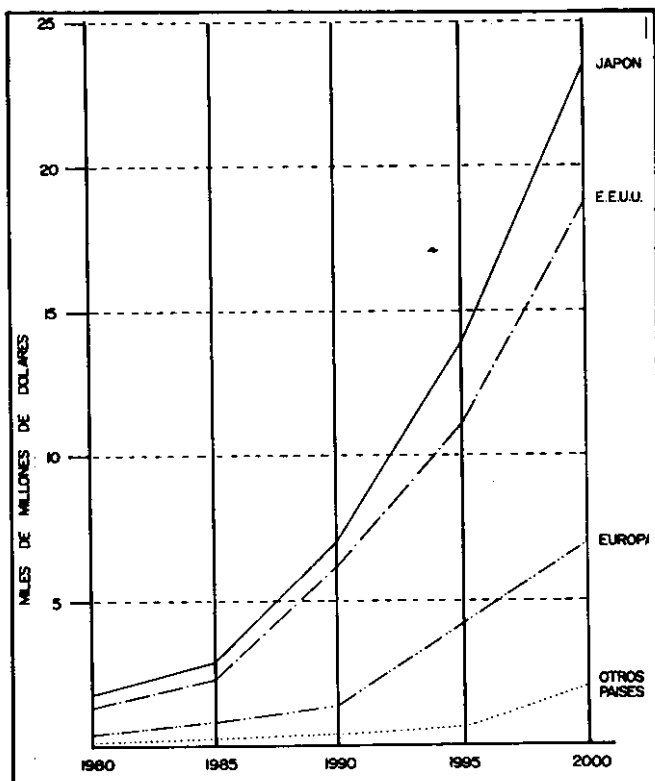
Es difícil presentar logros palpables en esta industria por el carácter restringido de la información en esta área. Sin embargo, se conoce la existencia de aviones de guerra con corazas cerámicas que impiden la acción del radar.

El cuadro 1 tomado de Escardino y Amoros (1987), refleja la situación actual y las previsiones en el mercado mundial de cerámicas técnicas hasta el año 2000. El crecimiento de los mercados japonés y estadounidense muestra tendencias casi paralelas, ocupando de todas maneras el Japón el primer puesto. En Europa la producción comienza a ser importante pero su nivel es aún inferior al de los dos países citados. Para el año 2000 el mercado superará los 50.000 millones de dólares a escala mundial.

El estudio citado anota también que en la actualidad la mayor producción mundial es la de cerámicas funcionales (10.390 millones de dólares) en relación con las estructurales (2.110 millones de

Cuadro 1

Evolución del mercado de nuevas cerámicas
(Escardino y Amoros - T. Cerámica No. 154)



dólares). Aproximadamente el 62% pertenece a las primeras y el 24% a las segundas y se estima que esta tendencia continuará en la presente década.

¿Qué perspectivas se presentan para los próximos años?

La cerámica funcional está prácticamente incorporada a numerosos sistemas desde principios de la década de los 80 por lo que su mercado ya asegurado se expande constantemente. El conocimiento profundo de los materiales ayudado en la actualidad con poderosas herramientas analíticas que permiten poner en relación las propiedades del material con su estructura interna, es el motor que impulsa la obtención de materiales cada vez más específicos en sus funciones hasta tal punto que no pasará mucho tiempo para que el diseño de materiales por pedido y a la medida sea práctica común de los ingenieros de materiales. Los procesos de obtención de polvos cerámicos de alta pureza y pequeño tamaño así como la obtención de películas con características precisas de funcionalidad son otros tópicos que están acaparando la atención de los investigadores en todo el mundo.

La investigación en cerámica estructural y compuestos está dirigida a obtener materiales menos frágiles, más livianos, más económicos y que puedan reemplazar con éxito los metales y los plásticos. Por ejemplo, numerosos productos de consumo son candidatos para estos materiales como todo el menaje de cocina, cuerpos de máquinas de fotografía y cortadoras de césped. En los Estados Unidos se espera que el mercado total de compuestos,

crecerá a 10 billones de dólares en la mitad de la década de los noventa.

En el área de compuestos se están estudiando los procesos de obtención de fibras de diferente naturaleza para reforzar matrices cerámicas; uno de los mayores problemas es el presentado por las interfaces fibra-matriz, así como los procesos de moldeo y obtención del producto final. Como hemos visto, el trabajo se está realizando y permite prever que la nueva era de la cerámica apenas comienza y en el futuro prestará grandes servicios a la humanidad.

Es bueno terminar con una reflexión sobre la situación y perspectivas en Colombia para estos materiales.

En la Universidad Industrial de Santander se desarrolló el año pasado un proyecto para la producción de carburo de silicio a partir de cascarilla de arroz. Este trabajo mereció el premio de Ciencias de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales por su innegable importancia para el aprovechamiento de este abundante subproducto agrícola colombiano. En la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional, un grupo interdisciplinario de físicos y químicos está desarrollando películas cerámicas que puedan ser utilizadas en el programa de calefacción solar. En el Departamento de Química de la misma facultad se estudió un proceso de síntesis de silicato de tetraetilo y se están iniciando trabajos de obtención de óxidos puros a partir de minerales nativos.

Es el momento de reflexionar seriamente sobre las posibilidades de investigación y desarrollo que tiene nuestro país en este campo y fijar prioridades para que los esfuerzos no se pierdan por dispersión. Tal vez, el ejemplo de la Comunidad Económica Europea nos sirva para volver los ojos hacia el resto de Latinoamérica y proponer planes conjuntos para conocer nuestros recursos y necesidades. El conocimiento de nuestra naturaleza minera y la importancia que tienen nuevos elementos como el titanio, el bario, el berilio, el magnesio y el aluminio, para no nombrar sino algunos, nos permitirá una mayor capacidad de negociación con los países que carecen de recursos pero que por su adelantada tecnología ya los está requiriendo en gran escala.

Siguiendo los lineamientos planteados por Wood (1988), del análisis de los nuevos materiales se puede concluir que en la actualidad los diseñadores disponen de gran número de nuevos elementos que satisfacen sus necesidades y las del mercado. El mundo está lleno de ideas brillantes en relación con materiales aún exóticos susceptibles de ser aplicados en procesos hoy día muy costosos. Por lo anterior, muchos gobiernos se ven forzados a seleccionar prioridades. Esta selección se hace dando preferencia a aquellos proyectos que satisfacen de inmediato la infraestructura de la ingeniería y de la in-

dustria de cada país. Esto no quiere decir que no deban emprenderse trabajos básicos generales, pero la necesidad de obtener resultados inmediatos, por ejemplo en un lapso de cinco años, si se maneja apropiadamente, puede generar excelentes resultados. De otra parte, los materiales y procesos no pueden separarse; por ejemplo, las propiedades y funcionamiento de los plásticos moldeados por inyección pueden variar ampliamente de acuerdo con los parámetros del proceso y del diseño del molde. Este hecho y las ideas expuestas sobre los nuevos materiales, ponen de presente que el desarrollo de los mismos es multidisciplinario y sólo se puede alcanzar mediante el trabajo en equipo. Dependiendo del tamaño del problema, en este equipo deberán intervenir expertos en varias disciplinas tales como: físicos, químicos, ingenieros, científicos de materiales, ingenieros de diseño de producción, vendedores y financistas.

Finalmente nuestro recurso humano, aunque escaso, está muy bien capacitado y sólo espera que se le brinde la oportunidad de especializarse en el área de la cerámica para afrontar la investigación en un futuro próximo; es de esperarse que los resultados de este evento movilicen la voluntad de los organismos que tienen el poder, para que soporten efectivamente la investigación y el desarrollo de la cerámica en nuestro país.

Bibliografía

- Bowen Kent**, 1986: "Nuevas Cerámicas". *Investigación y Ciencia*, 123: 135-144.
- Ceramitec 88**: Ed. "Tecnologías para la producción de cerámica fina". *Técnica cerámica*, 170: 41-45.
- Colin Leach**: 1987. "Materiales Cerámicos para el automóvil Futuro". *Técnica Cerámica* 157: 460-464 (Octubre).
- Escardino Benloch A. & J.L. Amoros Albaro**: 1987. "Los nuevos Materiales Cerámicos". *Técnica Cerámica* 154: 266-276.
- Freemantle Michael**, 1989. "Superconductors". *Impact of Science on Society* 39 (154): 133-142.
- Juillard Jacqueline**, 1988. "Advanced Ceramics" *Impact of Science on Society* 38 (149): 25-37.
- Kirk R.E. & D.F. Othmer**, 1966. "Enciclopedia de Tecnología Química". Ed. Unión Tipográfica Editorial Hispanoamericana Urthea México 4: 246, 247, 251, 274, 276; 6: 484, 486, 490.
- Whatmore R.H.** 1988: I Curso internacional sobre materiales cerámicos. Centro Internacional de Física (CIF). Bogotá, octubre 10-15 de 1988.
- Wood J.V.**, 1988. "Materials by Design" *Impact of Science on Society* 38-1 (149): 5-13.
- World Report on Advanced Ceramics**. Technical Insights, Inc. December 1988 - January 1989.