

Síntesis de materiales cerámicos biomórficos

Resumen: Cerámicas y vidrios son algunos de los materiales de ingeniería más resistentes a las condiciones ambientales. También son algunos de los materiales más avanzados que se están desarrollando para la industria aeroespacial y electrónica. En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica sobre la preparación de materiales cerámicos con microestructuras biomórficas. En general, se obtienen preformas de carbón biológico (C_B -plantillas) a partir de maderas con diferentes estructuras por pirolisis a alta temperatura (800 a 1800 °C), que se usan como plantillas para la infiltración, principalmente, con Si gaseoso o líquido para formar cerámicas con SiC y SiSiC.

Introducción

Se comprende bajo la denominación de material cerámico un grupo de materiales preparados originariamente por moldeo plástico y cocción subsiguiente de la arcilla. Su aparición se remonta a la época de transición del mesolítico al neolítico, en que las civilizaciones de entonces los usaban, sobre todo, para la fabricación de ladrillos y recipientes, así como de objetos artísticos.

Si nos atuviésemos a este concepto, las materias primas usadas en su preparación serían productos térreos, indicando con ello materiales derivados de productos naturales. Pero el desarrollo de la tecnología, sobre todo en las últimas décadas, ha traído como consecuencia la distinción entre materiales estructurales y materiales funcionales.

Materiales estructurales (Materiales cerámicos tradicionales): Se basan principalmente en la arcilla. Sus propiedades mecánicas ocupan un lugar preferente y sus aplicaciones se centran en la preparación de piezas, construcciones, aparatos.

Materiales funcionales (Materiales cerámicos de ingeniería): Están constituidos principalmente por compuestos puros o casi puros; principalmente óxidos, carburos o nitruros. Algunos de los cerámicos de ingeniería más importantes son: alúmina (Al_2O_3), nitruro de silicio (Si_3N_4), carburo de silicio (SiC) y zircona (ZrO_2) combinados con algunos otros óxidos refractarios. Es fundamental su comportamiento especial eléctrico, magnético, químico u óptico.

Esto ha motivado que los cerámicos modernos sean preparados con materiales de muy diverso origen. En la tecnología moderna se impone abandonar, cada vez más, la idea de que los cerámicos son productos resultantes de procesar la arcilla, como materia prima, y, en vez de ello, considerar a los productos cerámicos como materiales sintéticos que no son ni compuestos orgánicos (polímeros) ni metales, aunque puedan contener elementos de uno u otro tipo (óxidos, carburos, nitruros) como constituyentes o aditivos; son compuestos inorgánicos y no metálicos, de carbono, nitrógeno, boro, silicio y metales unidos de forma iónica.

El tratamiento térmico es un paso esencial en la fabricación de la mayoría de los productos cerámicos, uno de estos



C. Bosch Ojeda



F. Sánchez Rojas



J. M. Cano Pavón

tratamientos es el secado. El propósito del secado de cerámicos es eliminar agua del cuerpo cerámico antes de ser sometido a altas temperaturas. Generalmente, la eliminación de agua se lleva a cabo a menos de 100 °C y puede tardar alrededor de 24 horas para una pieza de cerámica grande. La mayoría de los cementadores orgánicos pueden extraerse de las piezas cerámicas por calentamiento en el rango de 200 a 300°C; aunque algunos residuos hidrocarbonados pueden requerir un calentamiento a temperaturas mucho más elevadas.

Otro tratamiento térmico utilizado es la sinterización, proceso por el que se consigue que pequeñas partículas de un material se mantengan unidas por difusión en estado sólido. En la fabricación de cerámicos este tratamiento térmico se basa en la transformación de un producto poroso compacto en otro denso y coherente.

El procesado sol-gel se encuentra entre las nuevas tecnologías que se están desa-

rollando más rápidamente para la fabricación de cerámicos y vidrios. En los cerámicos, este método permite la formación de partículas uniformes y finas de alta pureza a temperaturas relativamente bajas. Estos polvos se pueden sinterizar a continuación hasta conseguir una alta densidad con sus correspondientes buenas propiedades mecánicas. En tales técnicas, la característica fundamental es la formación de una disolución organometálica. La fase dispersa "sol" se convierte en un "gel", el cual, a su vez, alcanza su composición final por medio de diversos tratamientos térmicos. Una ventaja clave del proceso sol-gel es que el producto que se forma inicialmente mediante este procedimiento de fase líquida puede ser calcinado a temperaturas más bajas, comparadas con las de los procesos convencionales para cerámicos.

Cerámicas biomórficas

El carburo de silicio biomórfico (bioSiC) es un nuevo material cerámico avanzado de base SiC, fabricado mediante un proceso rápido, barato y totalmente ecológico, que utiliza como materia prima la madera industrial (Figura 1). El bioSiC presenta unas excelentes prestaciones termo-mecánicas y estabilidad química y estructural, que se mantiene en un amplio rango de temperaturas (hasta 1350°C). Las aplicaciones del bioSiC son potencialmente amplias, y en algunos casos totalmente novedosas sobre todo en elementos donde es preciso combinar las exigencias típicas de las cerámicas avanzadas con un bajo coste y una elevada versatilidad.

Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencias,
Universidad de Málaga, 29071 Málaga
C-e: fsanchezr@uma.es

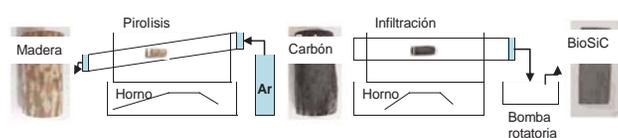


Figura 1. Fabricación de carburo de silicio biomórfico

En los últimos años se ha puesto de manifiesto un considerable interés en la síntesis y optimización de materiales de microestructura biomórfica, como lo demuestra la evolución en el número de publicaciones sobre este tema, desde su primera aparición en el año 1998, que se recoge en la Figura 2. Los materiales objeto de esta investigación se sintetizan mediante la pirolisis e infiltración de silicio fundido a temperatura elevada en preformas de madera.

Las estructuras biológicas presentan una anatomía construida jerárquicamente, desarrollada y optimizada a lo largo del proceso evolutivo, dando como resultado unas relaciones entre las propiedades mecánicas y la microestructura, que son únicas y han pasado a ser de gran interés para el procesado avanzado en los últimos años.^[1,2] Debido a los procesos de evolución genética, las estructuras biológicas exhiben, una baja densidad, una excelente resistencia, alta dureza y elasticidad, y tolerancia al daño tanto a micro como a macro-escala.^[3] El hecho de que los árboles sean capaces de permanecer derechos como vigas durante cientos de años es debido al alto nivel de sus propiedades mecánicas.^[4]

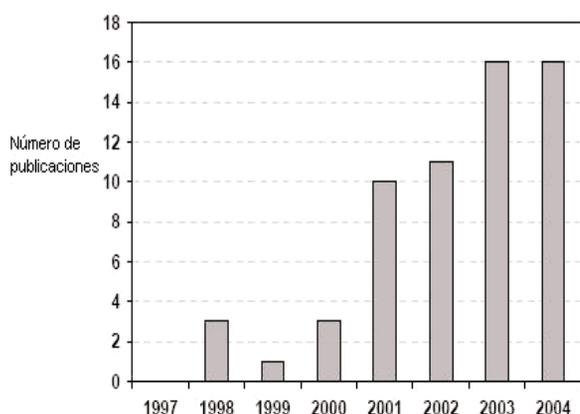


Figura 2. Desarrollo del número de publicaciones sobre cerámicas biomórficas

La razón de esto no se encuentra en una propiedad particular, sino más bien, en una extraordinaria combinación de propiedades mecánicas y en la forma en la cual éstas se relacionan con la morfología y estructura del material. La madera es un material natural compuesto con una arquitectura donde biopolímeros como celulosa, hemicelulosa y lignina forman una microestructura celular de alta porosidad que, sin embargo, exhibe una extraordinaria combinación de resistencia, rigidez y dureza,^[5,6] por ello, el uso de madera como material plantilla, o material dador de la estructura, produce materiales cerámicos con porosidad alta y dirigida combinada con la resistencia necesaria para aplicaciones como estructuras aislantes acústicas y térmicas. Las cerámicas biomórficas^[7-13] estudiadas en este trabajo son especialmente interesantes ya que conjugan las ventajas de estas estructuras naturales con la capacidad de ser empleadas en aplicaciones estructurales a temperaturas elevadas propias del carburo de silicio.^[14-18]

El carburo de silicio es un material industrial de gran importancia, con un considerable número de aplicaciones:

células solares, contenedores de combustible nuclear y materiales electrónicos.^[19,20] De las distintas fases del carburo de silicio, la β -SiC es la más útil debido a su alta resistencia a la oxidación y a la radiación, apropiada resistividad eléctrica y ancho hueco de bandas para uso como semiconductor, alta resistencia y dureza, relativamente alta conductividad térmica y baja expansión térmica.^[21]

Síntesis

Las excelentes propiedades de ambos materiales, madera y carburo de silicio, han llevado a la fabricación de cerámicas basadas en SiC por conversión de la madera a través de diferentes reacciones de infiltración, produciendo materiales porosos con una estructura de poros unidireccional a nivel de micrómetros y una diseñada morfología estructural.^[22]

Los diversos métodos de fabricación tradicionales del SiC son:

- Sinterizado en caliente sin presión^[23-25]
- Sinterizado en caliente con presión^[26]
- Deposición química en fase vapor^[27]
- Compactado por reacción^[28,29]

Frente a estos, la fabricación de SiC mediante pirolisis e infiltración de silicio en madera presenta potencialmente las siguientes ventajas:

- Bajo coste de fabricación, ya que las temperaturas de procesado son inferiores a los métodos de fabricación tradicionales y no es necesario partir de polvo de SiC de alta pureza.
- No es necesario el uso de aditivos.
- Aumento significativo en las velocidades de síntesis al usar una estructura con porosidad abierta.
- Gran diversidad de micro-estructuras y propiedades en función de la madera precursora. La estructura final de SiC después de la infiltración mimetiza la de las preformas de carbón como se observa en las micrografías presentadas en la Figura 3.
- Obtención de forma natural de una estructura similar a la de los materiales de fibra continua, en contraposición a otros procesados mucho más costosos.^[30]
- Posibilidad de fabricar piezas con formas complejas, ya que sólo requerirá el modelado de la madera carbonizada.
- Alta resistencia y tenacidad introducida por la estructura fibrosa de la madera.

En los últimos años se recogen en la bibliografía distintas alternativas para la síntesis de estos nuevos materiales, que combinan las diferentes variables que pueden influir en el producto final obtenido, entre las que podemos destacar las siguientes:

- Calentamiento de la madera en una atmósfera no oxidante a temperaturas por encima de 600°C que produce la descomposición de los constituyentes poli-aromáticos para formar un residuo de carbón que reproduce perfectamente la estructura celular original de la misma. A continuación, el SiC con alta porosidad anisotrópica se produce a partir de la madera por infiltración líquida de la preforma carbonizada con tetraetilortosilicato y posterior calentamiento a 1400°C en atmósfera de argón.^[31] La estructura de la madera carbonizada se ha utilizado también como plantilla para varios procesos alternativos de reacción como los que se destacan a continuación.

Síntesis de materiales cerámicos biomórficos

- Infiltración con Si líquido.^[22,32,33] Empleando este mismo procedimiento, se estudia la influencia de diferentes clases de madera como producto de partida; así, maderas naturales de diferente distribución de tamaño de poro y composición se carbonizan a 1800 °C en atmósfera inerte, después de lo cual se infiltran a 1600 °C, obteniéndose materiales cerámicos de diferente estructura de poro.^[34]
- Infiltración con Si vapor.^[22,35]
- Infiltración con monóxido de silicio.^[36]
- Infiltración de madera químicamente preprocesada o productos lignocelulósicos técnicos con precursores órgano-metálicos y metal-orgánicos gaseosos o líquidos y posterior oxidación para la eliminación de la fase carbonosa libre.^[37]

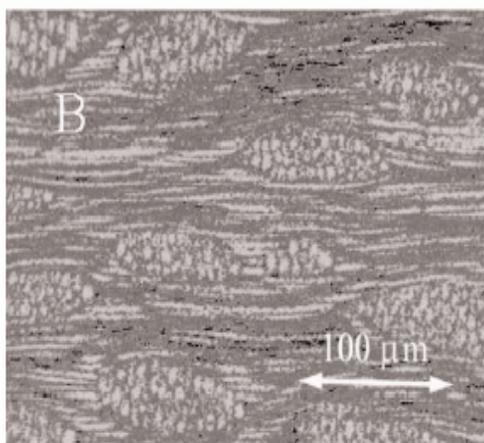
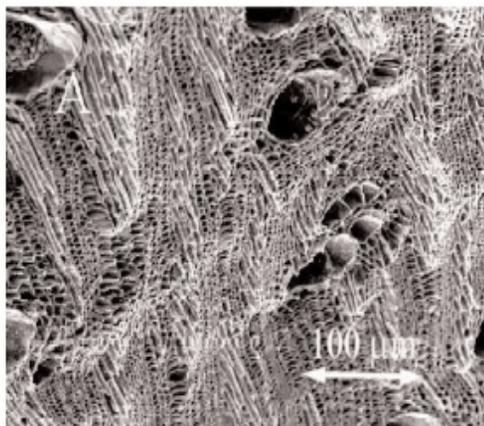


Figura 3. Micrografías de: A) Preformas de carbón B) Cerámica biomórfica de SiC^[11]

Secado y pirolisis

Entre los procedimientos descritos en la bibliografía podemos destacar los que se resumen a continuación: En primer lugar, Byrne y Nagle investigan la carbonización de diferentes tipos de maderas y las propiedades de los productos obtenidos.^[38] Posteriormente, en un estudio realizado por Sieber y col.,^[22] se han usado diferentes clases de maderas naturales (roble, arce, balsa, ébano, pino, haya) con diferentes densidades y estructuras porosas. El secado se realiza a 70 °C durante 15 horas y la pirolisis se divide en dos etapas, ambas en atmósfera de N₂:

- Calentamiento lento a 1 °C/min hasta alcanzar una temperatura de 500 °C; en esta etapa los polímeros hidrocarbonados poliaromáticos (celulosa, hemicelulosa, lignina) se descomponen completamente y forman carbón.

Calentamiento a mayor velocidad (5 °C/min) hasta alcanzar la temperatura final, comprendida en un rango de 800–1800 °C, con un tiempo de permanencia en la misma de 4 horas.

Los componentes biopoliméricos mayoritarios de la madera son celulosa, hemicelulosa y lignina; además la madera contiene algunos compuestos macromoleculares adicionales, como son diferentes clases de grasas, aceites, ceras, minerales, alcaloides, etc., como constituyentes minoritarios. Así, una composición típica de madera blanda es 48 % celulosa, 19 % hemicelulosa y 30 % lignina, que difiere muy poco de la de la madera dura que es 45 %, 27 % y 22 %, respectivamente. La composición elemental media de la madera es 50 % C, 43.4 % O, 6.1 % H, 0.2 % N y 0.3 % cenizas.

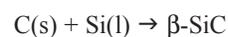
Durante la pirolisis de los componentes biopoliméricos mayoritarios de la madera, lignina y celulosa, en atmósfera inerte, la pérdida de peso empieza alrededor de 200 °C. A 600 °C, la pérdida de peso total es aproximadamente del 80 % para la celulosa y 50% para la lignina. La reacción de degradación térmica de la celulosa se puede dividir en dos etapas:

- Pirolisis a baja temperatura: Pérdida de agua, resultando celulosa "deshidratada", seguida de la eliminación de moléculas pequeñas como CO y CO₂ alrededor de 260 °C.
- Carbonización a temperatura superior a 600 °C: Rotura de las cadenas de carbono de las estructuras de los biopolímeros y formación de estructuras de grafito.

Durante el calentamiento de la madera, la descomposición de los biopolímeros conduce a una pérdida de peso final entre 70–80 %, dependiendo de la clase y composición de la madera. La descomposición térmica de los biopolímeros termina alrededor de los 600 °C y lleva a la formación de estructuras de carbono amorfas de C_B. Los posteriores calentamientos hasta 1800 °C incrementan la cantidad y tamaño de estructuras de grafito en el carbono.

Infiltración de silicio

Silicio líquido: En contacto con Si líquido ocurre una infiltración en los poros de la preforma de carbón. La reacción que tiene lugar es:



En la interfase carbono-silicio se forman granos de β -SiC con un tamaño medio de partícula de 5 μm . Después de la infiltración del silicio líquido los poros se llenan de silicio líquido hasta un diámetro de poro máximo de aproximadamente 30 μm . Los poros mayores no contienen silicio residual, ya que el carbono se transforma completamente en β -SiC. El contenido de Si residual depende de la porosidad total de la preforma y del diámetro de los poros.^[39-41] Esta misma técnica de infiltración de silicio líquido se ha utilizado utilizando como precursor palmas de rattan^[42] y plantas monocotiledóneas.^[43]

Silicio gaseoso: Los resultados obtenidos son similares a los anteriores, sin embargo, en contraste con lo anterior, conduce a una simple fase de SiC sin Si residual y a una porosidad mucho mayor del material. En otro estudio, usando madera de pino, se realiza la infiltración con Si, SiO y CH₃SiCl₃ y se determina el efecto de la microestructura sobre la fractura.^[44] Qian y col. en varios estudios^[45-50] también emplean este tipo de infiltración para la preparación de

cerámicas a partir de diferentes tipos de madera y posterior estudio de sus propiedades.

Otros tipos de infiltración: Klingner y col.^[51] proponen una infiltración con varias clases de sílice (sol). El material resultante (SiO_2/C) se transforma en SiC por una reducción carbotérmica. Zollfrank y col.^[52] sintetizan cerámicas biomórficas compuestas de SiOC/C con diferentes porosidades y diseño de la microestructura a partir de madera de pino y haya. En una primera etapa, el compuesto bioplantilla/ polisilixano se prepara por infiltración y reacción de las preformas de madera con Si-PMHS (polimetilhidrosiloxano) a 120°C durante 12 horas. A continuación, la pirolisis del material híbrido obtenido biopolímero/polixilosano se realiza en atmósfera inerte a 800°C.

Infiltración de otros tipos de compuestos y/o diferentes tipos de precursores

En general, se han aplicado dos propuestas diferentes para convertir las preformas biológicas en cerámicas: a) no-oxidicas, por transformación, como se ha explicado en los apartados anteriores;^[22,32,36,53] b) oxidicas, por sustitución, proceso en el que la preforma biológica nativa o pirolizada se reviste internamente con sales o precursores orgánicos metálicos y se somete a oxidación para eliminar después el carbón,^[54-56] como se describe a continuación.

- 1.- Al_2O_3 : - Infiltración sol/gel en fibras de yute.^[57]
 - Síntesis de cerámicas con Al_2O_3 y ZrO_2 en plantas.^[58]
 - Infiltración sol/gel con soluciones de alúmina de baja viscosidad en preformas de madera y posterior sinterización en aire a 1550 °C.^[59]
 - Alúmina en fibras de algodón.^[60]
 - Alúmina y aluminio.^[61] Infiltración con Al (vapor) en tejidos de plantas naturales, como por ejemplo el rattan.^[62]
 - Formación de Al_2O_3 y ZrO_2 por infiltración de sales metálicas en fibras de coco, yute y lino.^[63]
 - Infiltración de sales de aluminio en fibras de sisal.^[64]
- 2.- ZrO_2 : - En maderas de pino (blanda) y jelutong (dura) con ZrO_2 sólido y/o silicio líquido.^[65]

Rambo y col.^[66] proponen la síntesis de cerámicas biomórficas YSZ (yttria-stabilized zirconia), altamente porosas, por infiltración de soluciones de oxiclورو de zirconio ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) en plantillas derivadas de madera de rattan y pino. Se añade nitrato de itrio para estabilizar la fase tetragonal del ZrO_2 . Después de la infiltración a vacío, los materiales se pirolizan a 800°C en atmósfera de nitrógeno o en aire hasta 1550°C obteniéndose distintas cerámicas cuyas propiedades dependen de los parámetros de procesamiento empleados.
- 3.- Titanio: - Ota y col.^[67] sintetizan una cerámica con titanio a partir de madera, similar a las cerámicas anteriores que contienen silicio siguiendo el siguiente procedimiento: 1) introducción de isopropóxido de titanio en maderas por infiltración en vacío; 2) hidrólisis del isopropóxido de titanio en la célula de la estructura para formar titanio gel; 3) calentamiento a una temperatura de 600-1400°C en aire.
 - Cerámicas- TiO_2 porosas desde preformas biológicas vía proceso sol-gel^[68]: Los materiales biológicos, previamente secados a 70°C durante 24 horas, se filtran a vacío

durante 30 minutos con una solución de óxido de titanio de baja viscosidad, preparada a partir de isopropóxido de titanio y modificada con ácido acético; se pirolizan en atmósfera inerte a 800°C y posteriormente, recocido en aire. Estas cerámicas porosas conteniendo TiO_2 son de interés debido a sus propiedades fotocatalíticas y bioactivas. Existen estudios previos sobre síntesis de espumas- TiO_2 vía un proceso sol-gel;^[69] espumas- TiO_2 con estructuras totalmente abiertas y porosidad mayor del 78 %;^[70] fibras- TiO_2 .^[54,56,71]

4.- Cerámicas biomórficas MeC (donde Me = Si, Ti, Zr): Producidas por infiltración de suspensiones coloidales órgano-metálicas de baja viscosidad en plantillas de carbón biológico e hidrolizadas in-situ para formar hidrogeles. Después de la hidrólisis, las plantillas infiltradas se someten a alta temperatura (pirolisis a 1600°C) para promover la descomposición del gel en óxidos metálicos. La reacción carbotérmica de los óxidos metálicos con la plantilla de biocarbón conduce finalmente a la formación de las cerámicas biomórficas.^[72,73]

5.- Papel como precursor^[74]: Cerámicas biomórficas de SiC, altamente porosas, preparadas por pirolisis con polvo de Si en atmósfera inerte a temperaturas por encima de 1400°C.

Singh y col.^[75] resumen y discuten la fabricación de las denominadas "ecocerámicas". Zollfrank y col.^[76] proponen la infiltración con silicio seguida de otra infiltración de aluminio.

Por último, otra propuesta reciente es la realizada por Chakrabarti y col.^[77] para la síntesis de cerámicas biomórficas conteniendo silicio y molibdeno.

Síntesis mediante la técnica de infiltración y reacción de vapor químico

Esta técnica se ha aplicado a la síntesis de cerámicas biomórficas de SiC y de TiC, a partir de madera y papel como precursores.^[78-82] Los sistemas de reacción aplicados para la preparación de cerámicas de SiC son: $\text{CH}_3\text{SiCl}_3 - \text{H}_2$, $\text{SiCl}_4 - \text{H}_2$ y $\text{SiCl}_4 - \text{CH}_4 - \text{H}_2$, y para la producción de cerámicas de TiC son: $\text{TiCl}_4 - \text{H}_2$ y $\text{TiCl}_4 - \text{CH}_4 - \text{H}_2$.

Conclusiones

Los materiales cerámicos biomórficos son una nueva clase de materiales estructurales derivados de la madera cuyo estudio, recientemente, está siendo de gran interés como se pone de manifiesto en esta revisión. El número de publicaciones sobre síntesis y aplicaciones de estas nuevas cerámicas ha crecido sistemáticamente desde el año 1998 hasta la fecha.

Las excelentes propiedades de la madera y el carburo de silicio han conducido a la fabricación de cerámicas basadas en SiC por conversión de la madera (y otros precursores), a través de diferentes reacciones de infiltración, produciendo materiales porosos con una estructura de poros unidireccional a nivel de micrometros y una diseñada morfología estructural, pero que siguen siendo compuestos cerámicos resistentes a las altas temperaturas y a la corrosión, con un amplio campo de aplicación.

Referencias

- [1] J. E. Mark, P. D. Calvert, *Mater. Sci. Eng.* **1994**, *1*, 159–173.
- [2] M. Alper, *Mat. Res. Bull.* **1992**, *17*, 53–55.
- [3] P. Greil, T. Lifka, A. Kaindl, *J. Eur. Ceram. Soc.* **1998**, *18*, 1975–1983.
- [4] G. Gurfinkel, "Wood Engineering", 2nd edn. Kendall/Hunt, Dubuque, Iowa, **1981**.
- [5] E. J. Gibson, *Met. Mater.* **1992**, *6*, 333–337.
- [6] P. W. Lucas, B. W. Darvell, P. K. Lee, T. D. B. Yuen, M. F. Choong, *Phil. Trans.* **1995**, *B348*, 363–372.
- [7] J. Martínez Fernández, A. R. De Arellano López, F. M. Varela Fera, M. Singh, "Procedimiento para la fabricación de carburo de silicio a partir de precursores vegetales", Patente n  P200102278 (Española), Universidad de Sevilla, **2001**.
- [8] J. Martínez Fernández, F. M. Varela Fera, M. Singh, *Scripta Materialia* **2000**, *43*, 813–818.
- [9] J. Martínez Fernández, F. M. Varela Fera, A. Domínguez Rodríguez, M. Singh, *Environment Conscious Materials* **2000**, 733–740.
- [10] A. Muñoz, J. Martínez Fernández, A. R. Pinto G mez, M. Singh, "Microestructure and High Temperature Compressive Mechanical Behaviour of Joints in Biomorphic Silicon Carbide Ceramics", Joining of Advanced and Specialty Materials III. ASM International, Materials Park, OH, EE UU, **2000**, 7.
- [11] A. Muñoz, J. Martínez Fernández, M. Singh, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2002**, *22*, 2727–2733.
- [12] F. M. Varela Fera, S. López Pombero, J. Martínez Fernández, A. R. De Arellano López, M. Singh, *Ceram. Eng. Sci. Proc.* **2001**, *22*, 135–143.
- [13] F. M. Varela Fera, S. López Pombero, A. R. De Arellano López, J. Martínez Fernández, M. Singh, "Microestructure-Mechanical Properties Correlation in Biomorphic Silicon-Carbide Based Ceramics", comunicación a la "26th Annual International Conference on Advanced Ceramics & Composites", Cocoa Beach, EE UU, **2002**.
- [14] W. D. Kingery, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **1980**, *59*, 598–600.
- [15] H. B. Strock, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **1996**, *75*, 71–76.
- [16] J. G. Sheek, J. D. Cawley, *Ceram. Trans.* **1989**, *2*, 47.
- [17] S. J. Dapkunas, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **1988**, *67*, 388–391.
- [18] K. Yamada, M. Mori, "Properties and applications of SiC ceramics", en "Silicon carbide ceramics", Elsevier Applied Science, **1991**, 13.
- [19] W. V. Goeddel, *Nucl. Appl.* **1967**, *3*, 599–560.
- [20] G. Verspui, en "T.O. Sedgwick (Ed.), Proceedings of the 7th International Conference on CVD", Los Angeles, EE UU, **1979**, 463–464.
- [21] G. D. Papasouliotis, S. V. Sotirchos, *J. Electrochem. Soc.* **1995**, *142*, 3834–3844.
- [22] H. Sieber, C. Hoffman, A. Kaindl, P. Greil, *Adv. Eng. Mat.* **2000**, *2*, 105–109.
- [23] S. Prochazka, GE report, SRD-72-035, **1972**.
- [24] S. Prochazka, R. M. Scanlan, *J. Am. Ceram. Soc.* **1975**, *58*, 72–72.
- [25] H. Tanaka, "Sintering of SiC", en "Properties and applications of SiC ceramics", "Silicon carbide ceramics", Elsevier Applied Science, **1991**, 213.
- [26] R. A. Alliegro, L. B. Coffin, J. R. Tinklepaught, *J. Am. Ceram. Soc.* **1956**, *39*, 386–389.
- [27] T. Hirai, M. Sasaki, *Ceram. Inter.* **1991**, *17*, 275–281.
- [28] C. Forrest, P. Kenedy, J. Shennan, *Special Ceramics* **1972**, *5*, 99–123.
- [29] O. Chakrabarti, S. Ghosh, J. Mukerji, *Ceram. Inter.* **1994**, *20*, 283–286.
- [30] R. Naslain, *Adv. Composite Mater.* **1999**, *8*, 3–16.
- [31] T. Ota, M. Takahashi, T. Hibi, M. Ozawa, H. Suzuki, *J. Am. Ceram. Soc.* **1995**, *78*, 3409–3411.
- [32] P. Greil, T. Lifka, A. Kaindl, *J. Eur. Ceram. Soc.* **1998**, *18*, 1961–1973.
- [33] D. W. Shin, S. S. Park, Y. H. Choa, K. Niihara, *J. Am. Ceram. Soc.* **1999**, *82*, 3251–3253.
- [34] P. Greil, T. Lifka, A. Kaindl, *Ceram. Trans.* **1998**, *83*, 425–432.
- [35] E. Vogli, H. Sieber, P. Greil, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2002**, *22*, 2663–2668.
- [36] E. Vogli, J. Mukerji, C. Hoffman, R. Kladny, H. Sieber, P. Greil, *J. Am. Ceram. Soc.* **2001**, *84*, 1236–1240.
- [37] P. Greil, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2001**, *21*, 105–118.
- [38] C. E. Byrne, D. C. Nagle, *Carbon* **1997**, *35*, 259–266.
- [39] C. Hoffman, H. Sieber, P. Greil, "Biomorphic SiSiC ceramic composites from preprocessed biological fibers", 4th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites, Munich, **2001**, 407–413.
- [40] H. Sieber, C. Zollfrank, L. Weisensel, P. Greil, *Key Eng. Mater.* **2004**, *264*, 743–746.
- [41] C. Zollfrank, H. Sieber, *J. Am. Ceram. Soc.* **2005**, *88*, 51–58.
- [42] A. Zampieri, H. Sieber, T. Selvam, G. T. P. Schwieger, F. Scheffler, M. Scheffler, P. Greil, *Adv. Mater.* **2005**, *17*, 344–349.
- [43] O. P. Chakrabarti, H. S. Maiti, R. Majumdar, *Bull. Mater. Sci.* **2004**, *27*, 467–470.
- [44] P. Greil, E. Vogli, T. Fey, A. Bezold, N. Popovska, H. Gerhard, H. Sieber, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2002**, *22*, 2697–2707.
- [45] J. M. Qian, J. P. Wang, Z. H. Jin, *Mater. Chem. and Phys.* **2003**, *82*, 648–653.
- [46] J. M. Qian, J. P. Wang, Z. H. Jin, *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng* **2004**, *33*, 1065–1068.
- [47] J. M. Qian, J. P. Wang, G. J. Quiao, Z. H. Jin, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2004**, *24*, 3251–3259.
- [48] J. M. Qian, J. P. Wang, Z. H. Jin, *Mater. Sci. Eng. A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing* **2004**, *A371*, 229–235.
- [49] J. M. Qian, X. W. Wang, Z. H. Jin, *Guisuanyan Xuebao* **2004**, *32*, 497–501.
- [50] J. M. Qian, Z. H. Jin, X. W. Wang, *Ceram. Inter.* **2004**, *30*, 947–951.
- [51] R. Klingner, J. Sell, T. Zimmermann, A. Herzog, U. Vogt, T. Graule, P. Thurner, F. Beckmann, B. Muller, *Holzforchung* **2003**, *57*, 440–446.
- [52] C. Zollfrank, R. Kladny, H. Sieber, P. Greil, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2004**, *24*, 479–487.
- [53] C. Zollfrank, R. Kladny, H. Sieber, P. Greil, *Ceram. Trans.* **2002**, *129*, 43–50.
- [54] M. Patel, B. K. Padhi, *J. Mater. Sci. Lett.* **1993**, *12*, 1234–1235.
- [55] H. Sieber, E. Vogli, F. Mullier, P. Greil, N. Popovska, H. Gerhard, *Key Eng. Mater.* **2002**, *206*, 2013–2016.
- [56] H. Sieber, J. Cao, C. Rambo, P. Greil, *Am. Ceram. Soc.* **2002**, *23*, 175–181.
- [57] M. Patel, B. K. Padhi, *J. Mater. Sci.* **1990**, *25*, 1335–1343.
- [58] H. Sieber, C. Rambo, J. Cao, E. Vogli, P. Greil, *Key Eng. Mater.* **2002**, *206*, 2009–2012.

- [59] J. Cao, C. Rambo, H. Sieber, *J. Porous Mater.* **2004**, *11*, 163–172.
- [60] G. J. Zhang, J. F. Yang, T. Ohji, *J. Am. Ceram. Soc.* **2001**, *84*, 1395–1397.
- [61] X. J. Ding, J. Z. Zhang, R. D. Wang, C. D. Feng, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2002**, *22*, 411–414.
- [62] C. R. Rambo, H. Sieber, *Adv. Mater.* **2005**, *17*, 1088–1091.
- [63] T. M. Ul'yanova, L. T. Sivakova, *Russ. J. Appl. Chem.* **1998**, *71*, 1450–1454.
- [64] T. E. Andrade Jr, A. E. Martinelli, D. M. A. Melo, R. M. Nascimento, C. Rambo, H. Sieber, P. Greil, *Ceramica* **2005**, *51*, 37–41.
- [65] M. Singh, B. Yee, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2004**, *24*, 209–217.
- [66] C. R. Rambo, J. Cao, H. Sieber, *Mater. Chem. Physics* **2004**, *87*, 345–352.
- [67] T. Ota, M. Imaeda, H. Takase, M. Kobayashi, N. Kinoshita, T. Hirashita, H. Miyazaki, Y. Hikichi, *J. Am. Ceram. Soc.* **2000**, *83*, 1521–1523.
- [68] J. Cao, O. Rusina, H. Sieber, *Ceram. Inter.* **2004**, *30*, 1971–1974.
- [69] A. Imhof, D. Pine, *Adv. Mater.* **1999**, *11*, 311–668.
- [70] H. Haugen, J. Will, A. K hler, U. Hopfner, J. Aigner, E. Wintermantel, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2004**, *24*, 661–668.
- [71] J. Huang, T. Kunitake, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 11834–11835.
- [72] C. Rambo, J. Cao, H. Sieber, *Ceram. Trans.* **2005**, *166*, 49–55.
- [73] C. Rambo, J. Cao, O. Rusina, H. Sieber, *Carbon* **2005**, *43*, 1174–1183.
- [74] O. Rusina, R. Kirmeier, A. Molinero, C. R. Rambo, H. Sieber, *Ceram. Trans.* **2005**, *166*, 171–176.
- [75] M. Singh, J. Martínez-Fernández, A. R. de Arellano-López, *Current Opinion in Solid State & Mater. Sci.* **2003**, *7*, 247–254.
- [76] C. Zollfrank, N. Travitzky, H. Sieber, T. Selchert, P. Greil, *Adv. Eng. Mat.* **2005**, *7*, 743–746.
- [77] O. Chakrabarti, L. Weisensel, H. Sieber, *J. Am. Ceram. Soc.* **2005**, *88*, 1792–1798.
- [78] D. A. Streitwieser, N. Popovska, H. Gerhard, G. Emig, *Ceram. Eng. Sci. Proc.* **2004**, *25*, 511–516.
- [79] N. Popovska, D. A. Streitwieser, C. Xu, H. Gerhard, H. Sieber, *Ceram. Eng. Sci. Proc.* **2004**, *25*, 535–540.
- [80] N. Popovska, D. A. Streitwieser, C. Xu, H. Gerhard, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2005**, *25*, 829–836.
- [81] D. A. Streitwieser, N. Popovska, H. Gerhard, G. Emig, *J. Eur. Ceram. Soc.* **2005**, *25*, 817–828.
- [82] H. Sieber, C. Zollfrank, N. Popovska, D. Almeida, H. Gerhard, *Key Eng. Mater.* **2004**, *264*, 2227–2230.



International Conference on Organometallic Chemistry



Zaragoza, Spain
23-28 July 2006

It is my very great pleasure, on behalf of the Organizing Committee, to invite you to attend the XXII International Conference on Organometallic Chemistry. The meeting will be held in Zaragoza from the 23rd to the 28th of July 2006. All modern advances and trends in organometallic chemistry will be discussed. Previous meetings have been held in Munich/Germany (1998), Shanghai/China (2000), Corfu/Greece (2002) and Vancouver/Canada (2004).



Contact

Scientific Secretariat

ICOMC2006

Department of Inorganic Chemistry
Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza
50.009 Zaragoza. Spain.

C-e: icome.2006@unizar.es

<http://wzar.unizar.es/icome2006>

Technical Secretariat

GRUPO PACIFICO

Avda. Cesar Augusto, 3 8 A
50004 Zaragoza, Spain

Tel: (+34) 902 900 444

Fax: (+34) 932 387 488

C-e: icome2006@pacifico-meetings.com

<http://www.pacifico-meetings.com>