

# Materiais avançados inspirados na natureza: estruturas celulares, fibras e compósitos <sup>1</sup>

Carlos Renato Rambo

Doutor em Tecnologia Nuclear [Matérias] – USP;  
Orientador/pesquisador – ENQ-UFSC.  
rambo@enq.ufsc.br, caixa postal 476,  
CEP 88040-900, Florianópolis – SC [Brasil]

Biomodelagem é uma tecnologia recentemente desenvolvida para fabricar cerâmicas a partir de estruturas naturais. Após processamento, o material resultante exibe estrutura celular similar à do original. Fibras biomórficas de SiC foram produzidas do bambu, por meio da redução carbotérmica da sílica naturalmente presente. Peças de bambu submetidas a pirólises a 1.500 graus Celsius (°C) em atmosfera de argônio promoveram a reação entre sílica e carbono. Gerou-se alumina biomórfica pela infiltração de vapor de alumínio em pré-formados pirolisados de ratã, pinheiro e sisal e subsequente oxidação. Durante infiltração em vácuo a 1.600 °C, bicarbonato e vapor de alumínio reagiram, formando  $Al_4C_3$ . Após processo de oxidação/sinterização a 1.550 °C durante três horas, os pré-formados de  $Al_4C_3$  converteram-se totalmente em  $Al_2O_3$ . As aluminas biomórficas obtidas mantiveram as características morfológicas das plantas originais no nível micrométrico. As caracterizações microestrutural e morfológica das cerâmicas biomórficas foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura, difratometria de raios X e picnometria ao hélio.

**Palavras-chave:** Biomodelagem. Cerâmicas avançadas. Cerâmicas biomórficas. Materiais celulares.



## 1 Introdução

Apesar da rápida substituição da madeira por novos materiais, novas aplicações estão sendo continuamente encontradas para ela [...] (BYRNE; NAGLE, 1997, tradução nossa).<sup>2</sup>

Essa frase foi escrita em 1919 e reflete, de maneira plausível, a demanda por novas tecnologias. Na natureza, encontram-se vários materiais com propriedades funcionais distintas, que evoluíram no decorrer do tempo e que merecem ser observadas também do ponto de vista tecnológico. Entre elas, destacam-se as mecânicas, que caracterizam-se pela dureza e pela resistência à flexão e pela compressão. A otimização de tais propriedades, durante o processo evolutivo natural, ocorreu de modo que os sistemas vivos passaram a utilizar a combinação de dois ou mais componentes, na forma de compósitos, para fins estruturais, ao invés de um único componente (VINCENT; CURREY, 1980; HAIGLER, 1985). No reino vegetal, madeiras, bambus (ou gramíneas) e fibras naturais (coco, juta, sisal etc.) exemplificam esse processo. No mundo animal, tecidos de reforço (cartilagem e paredes arteriais), casca de ovo, osso e conchas marinhas são exemplos típicos (VINCENT; CURREY, 1980). Em princípio, todos os vegetais ou materiais que contêm celulose, lignina ou minerais, com a finalidade de proteger seres vivos contra os efeitos danosos naturais, são considerados compósitos. O tipo e o número de componentes presentes nesses biocompósitos dependem de sua função.

A síntese biomimética (CALVERT, 1992; HEUER et al., 1992) de materiais tem recebido atenção especial devido à excelente resistência mecânica, às baixas densidades, à boa elasticidade e à tolerância a efeitos danosos naturais causados por intempéries climáticas, tanto em micro-

escala (nível celular) quanto em macroescala das bioestruturas utilizadas como modelo (*template*). Além disso, existe uma diversidade incalculável de combinações de componentes, que servem de modelo para a confecção de compósitos com diferentes funções.

Assim, o desenvolvimento de novos métodos de obtenção de materiais cerâmicos a partir de bioestruturas requer o controle do processo de transformação das microestruturas hierárquicas desses materiais em produtos cerâmicos com características equivalentes. Esse mimetismo artificialmente produzido pela engenharia de materiais tem sido investigado com o intuito de gerar materiais sintéticos que reproduzam as formas dos compósitos naturais (materiais biomórficos) por meio de biomodelagem (em inglês, *biotemplating*) (BYRNE; NAGLE, 1997; SIEBER et al., 2000).

Biomodelagem é uma tecnologia recentemente desenvolvida para a fabricação de cerâmicas biomórficas a partir de estruturas naturais (GREIL, 2001; PATEL; PADHI, 1990; SIEBER et al., 2002; ZOLLFRANK et al., 2002). Essa técnica consiste basicamente na conversão, em escala micrométrica, das bioestruturas em materiais cerâmicos. Após o processamento, a cerâmica biomórfica exibe uma morfologia de fibras ou de poros unidirecionais (estrutura celular) similar à do material de partida (OTA et al., 1995; RAMBO; MARTINELLI, 2001; VOGT; HERZOG; KLINGNER, 2002). Tal tecnologia oferece a possibilidade de produzir uma ampla variedade de materiais cerâmicos avançados, como carbetos (GREIL; LIFKA; KAINDL, 1998; SIEBER, 2002; VOGLI et al., 2001; VOGLI; SIEBER; GREIL, 2002), óxidos (CAO et al., 2004; CAO; RAMBO; SIEBER, 2004, OTA et al., 2000; RAMBO; CAO; SIEBER, 2004) e vitrocerâmica (SOUSA et al., 2005), com propriedades distintas e, conseqüentemente, viáveis para diferentes aplicações.

Cerâmicas celulares com estrutura de poros homogênea (monomodal), ou heterogênea (multimodal ou fractal), podem ser de grande interesse para aplicações em filtros de gases a altas temperaturas, em catalisadores que utilizam tecnologia ambiental e energética ou na fabricação de materiais compósitos para uso em tecnologia automotiva e aeronáutica.

Na indústria aeronáutica, componentes compósitos têm sido investigados, com o intuito de produzir materiais cada vez mais leves e com resistência mecânica e térmica superior à dos monolíticos ou monofásicos. Cerâmicas como SiC, carbono e alumina são amplamente utilizadas em forma de fibras, como reforço, em matrizes metálicas, cerâmicas ou poliméricas, conferindo ao material final resistência superior à dos materiais convencionais, que lhe permite suportar condições adversas durante o voo de uma aeronave, por exemplo. Muitas aplicações específicas podem ser destacadas, como blindagem de painéis laterais em aeronaves, em hélices de turbina, entre outras.

Uma outra classe de materiais naturais que podem ser convertidos em cerâmicas biomórficas são as fibras extraídas de plantas, como bambu e sisal.

Sisal é um material renovável de baixo custo. A sua alta resistência mecânica e o seu módulo de elasticidade, aliados à baixa densidade das suas fibras, têm despertado o interesse para a utilização desse vegetal em aplicações tecnológicas (BISANDA; ANSELL, 1992, CARVALHO, 2005). Recentemente, diversos estudos trataram do uso de fibras de sisal em aplicações de engenharia, como reforço, em materiais compósitos como cimento (TOLÊDO FILHO et al., 1999), polímeros, polipropileno (ZHOU et al., 2003), borracha (MARTINS; JOEKES, 2003) e amido (ALVAREZ; VÁZQUEZ; BERNAL, 2006).

Uma alternativa para a obtenção de produtos com alto valor agregado a partir do sisal é

o aproveitamento da estrutura da sua fibra para produção de fibras de cerâmicas avançadas, incluindo alumina e outros óxidos, carbetos ou nitretos, por meio de biomodelagem. A formação de cerâmicas, a começar de substratos de fibras naturais, tem sido estudada por vários grupos de pesquisa. Fibras de SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são produzidas a partir de casca de arroz, fibras de juta, do sisal e da casca de coco (PATEL; PADHI, 1990).

O bambu é um compósito natural cuja estrutura básica é uma matriz orgânica constituída de lignina (32% em massa, tipicamente) e celulose (e hemicelulose 61% em massa), com feixes vasculares dispersos no interior (LIESE, 1985). A casca verde possui uma concentração mais elevada de fibras, tornando-se gradual e radialmente mais dispersa em direção ao centro.

As fibras do bambu são pequenas, compostas de células espessas dispostas em feixes vasculares, chamados de microfibrilas, formando uma complexa estrutura em camadas hierárquicas denominada estrutura de paredes polilamelares (em inglês, *polylamellate wall structure*) (LIESE, 1985). As propriedades mecânicas do bambu são bem conhecidas. Esse material possui resistência máxima à tração ao longo das fibras e resistência mínima transversalmente a elas (JAIN; KUMAR; JINDAL, 1992). Algumas espécies de bambu podem ainda apresentar uma concentração relativamente alta de sílica distribuída na matriz celulósica (CARNELLI; MADELLA; THEURILLAT, 2001). A absorção desse composto pelas gramíneas chama-se silicificação, devido à incrustação das paredes celulares por sílica, e, além de funções estruturais, tem a finalidade de impedir sua digestão por espécies animais que delas se alimentam na forma *in natura*. Dentre as diversas aplicações do bambu, destaca-se sua utilização como planta ornamental e como material estrutural na construção civil.



Nessa perspectiva, este trabalho trata da conversão de diferentes espécies naturais, que apresentem características morfológicas distintas, em materiais cerâmicos por meio de biomodelagem.

## 2 Metodologia experimental

Cerâmicas biomórficas de  $Al_2O_3$  com porosidade anisotrópica e poros na faixa milimétrica e micrométrica serão produzidas por meio da infiltração de vapor alumínio em pré-formados pirolisados de precursores naturais: ratã (subfamília *Calamoideae*, família *Arecaceae*), pinheiro (*Pinus silvestris*), sisal (*Agave sisalana perrine*) e bambu (*Bambusa multiplex*). As amostras *in natura* foram pirolisadas a 800 °C durante uma hora, em atmosfera de nitrogênio, para a decomposição dos biopolímeros presentes nos materiais de partida (celulose, hemicelulose e lignina), dando origem ao carbono. Durante a pirólise, utilizou-se uma velocidade de aquecimento relativamente baixa (1,5 °C por minuto) para evitar danos nas paredes celulares do bioprecursor, causados pela rápida liberação dos gases resultantes da degradação das cadeias orgânicas.

Após a etapa de pirólise, as amostras foram submetidas ao processo de infiltração com pó de alumínio, exceto o bambu. Durante a infiltração em vácuo a 1.600 °C, o biocarbono reagiu com o vapor de alumínio, formando  $Al_4C_3$ . Após um processo de oxidação/sinterização a 1.600 °C por três horas, os pré-formados de  $Al_4C_3$  foram totalmente convertidos em  $Al_2O_3$ . Essa metodologia é detalhadamente descrita em publicação recente (RAMBO; SIEBER, 2005).

A síntese de fibras de SiC a partir do bambu foi realizada com o emprego de amostras de bambu pirolisado, objetivando a obtenção de SiC pela redução carbotérmica da sílica originalmente presente nas fibras.

A caracterização microestrutural e morfológica das cerâmicas biomórficas foi realizada utilizando-se as técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV-Philips XL-30), difratometria de raios X (DRX-Philips, X'Pert) e picnometria de hélio (AccuPyc 1330, Micromeritics). A porosidade das amostras foi calculada tendo como base a relação entre as densidades geométrica ( $\rho_G$ ) e picnométrica ( $\rho_P$ ).

## 3 Resultados e discussões

Conforme enumerações a seguir.

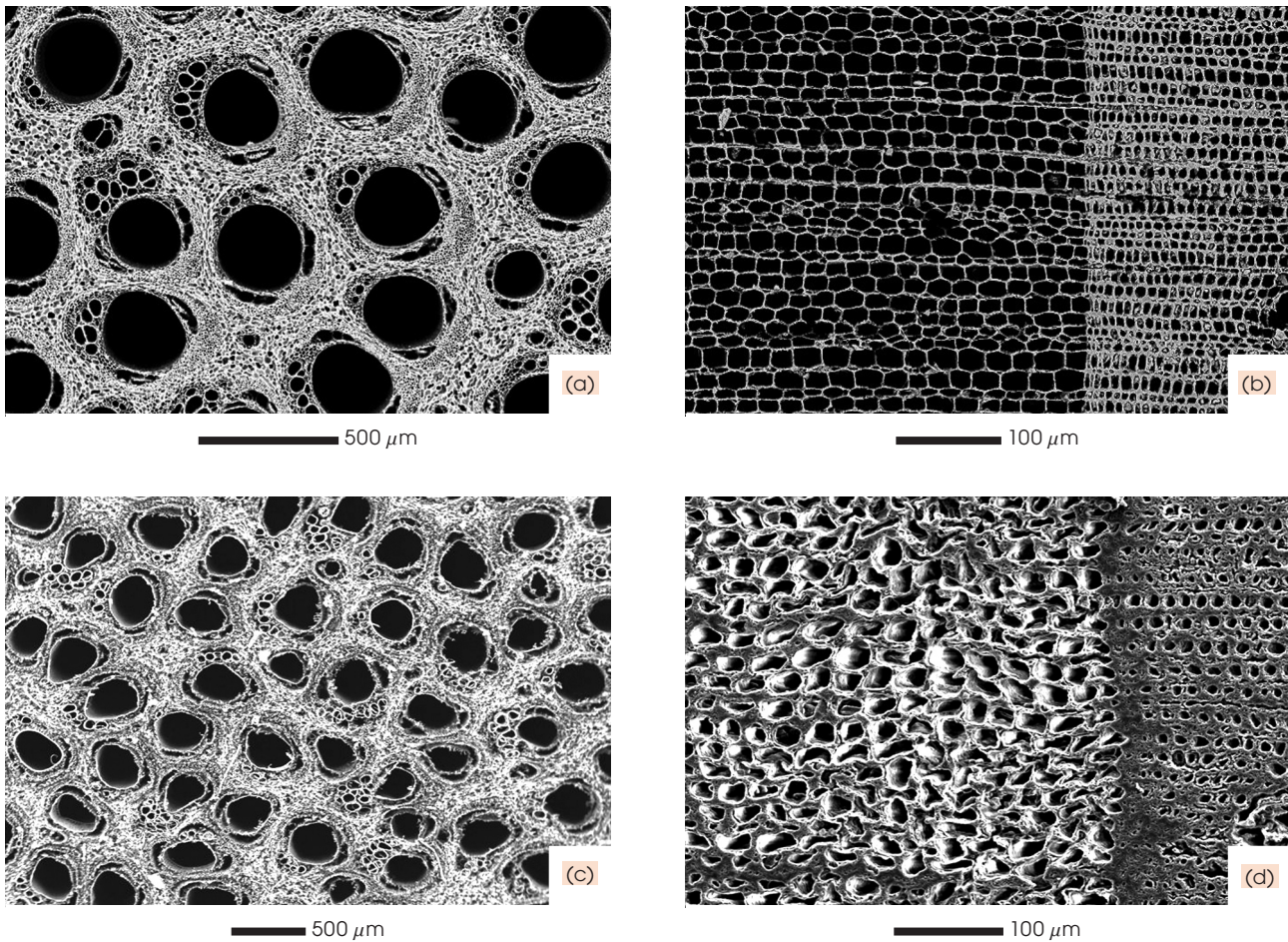
### 3.1 Cerâmicas celulares

A Fotografia 1 apresenta micrografias obtidas de MEV dos pré-formados pirolisados de ratã (Fotografia 1a) e pinheiro (Fotografia 1b) e as respectivas cerâmicas biomórficas obtidas (Fotografia 1c e Fotografia 1d, respectivamente), evidenciando as diferentes morfologias celulares. As micrografias representam cortes axiais (orientados ao longo dos vasos condutores).

Em contraste com as madeiras, o ratã, espécie de palmeira tropical, não apresenta anéis sazonais (ou anuais) e é caracterizado por uma distribuição de vasos homogênea. Na Fotografia 1a, podem-se observar os grandes vasos (200 a 330 micrômetros [ $\mu m$ ]) do metaxilema e as células menores (em torno de 90  $\mu m$ ), que compõem o floema, tecido característico dessa planta. No pinheiro, o anel anual compreende uma região de células do lenho tardio (Fotografia 1b, esquerda) e inicial (Fotografia 1b, direita).

Todas as características microestruturais dos pré-formados de carbonos originais de ratã e de pinheiro foram mantidas após a formação de  $Al_4C_3$  e subsequente oxidação/sinterização em  $Al_2O_3$ . Na  $Al_2O_3$  derivada do ratã (Fotografia 1c), observa-se a reprodução tanto dos vasos do





**Fotografia 1: Micrografias de MEV dos pre-formados pirolisados de a) ratã e b) pinheiro; c) e d) respectivas cerâmicas biomórficas obtidas**

Fonte: O autor.

metaxilema (200 a 330  $\mu\text{m}$ ) quanto das células do floema (90  $\mu\text{m}$ ). Analogamente ao ratã, na Fotografia 1d, a anatomia celular do pinheiro, caracterizada pelos anéis anuais, também foi reproduzida na alumina biomórfica. As células do lenho tardio possuem tamanhos em torno de 5 a 10  $\mu\text{m}$  enquanto as do lenho inicial se aproximam de 20  $\mu\text{m}$ .

A Tabela 1 mostra a densidade ( $\rho_G$ ) e a porosidade dos pré-formados de C ( $\rho_P = 1,5$  grama por centímetro cúbico [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]) e das respectivas  $\text{Al}_2\text{O}_3$  biomórficas ( $\rho_P = 3,95$   $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Em contraste com o pinheiro, os grandes poros do ratã definem sua porosidade total. Após a infiltração de alumínio gasoso, as células peque-

nas do ratã são obstruídas, aumentando a densidade do pré-formado (RAMBO; SIEBER, 2005). O tamanho de poro do ratã aumenta, devido à liberação de carbono restante (não-reagido em  $\text{Al}_4\text{C}_3$ ) durante a oxidação, levando ao aumento da porosidade total.

**Tabela 1: Propriedades físicas dos pré-formados de carbono e das respectivas  $\text{Al}_2\text{O}_3$  biomórficas**

	C-ratã	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -ratã	C-pinus	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -pinus
Densidade	0,23	0,55	0,34	0,49
Porosidade	83	89	76	87

Obs.: Densidade em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); porosidade em volume (%).

Fonte: O autor.

## 3.2 Fibras cerâmicas

Conforme enumerações a seguir.

### 3.2.1 Fibras de $\text{Al}_2\text{O}_3$

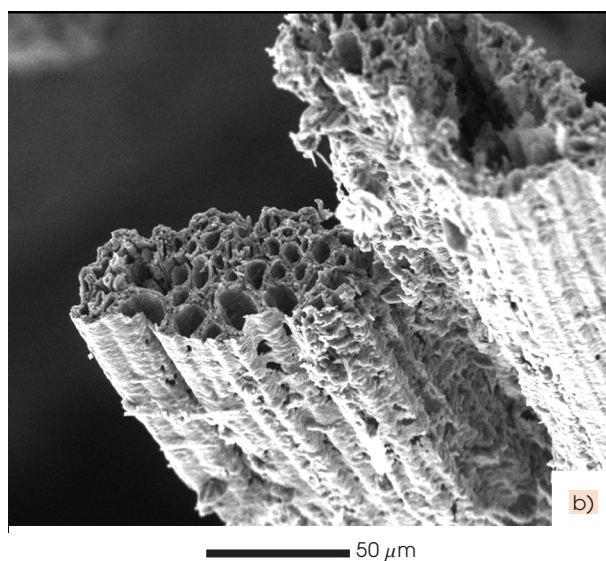
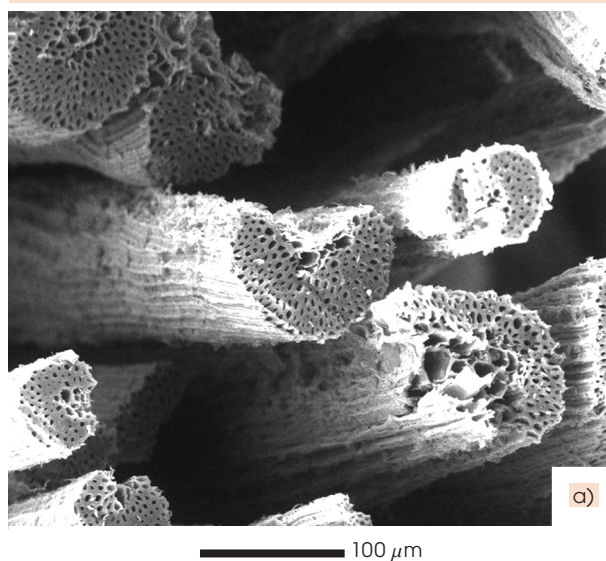
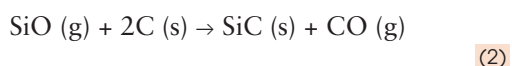
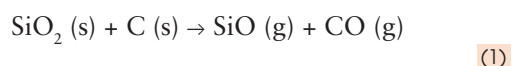
A Fotografia 2 mostra micrografias obtidas por meio de MEV de fibras de sisal, do tipo fita pirolisadas, (Fotografia 2a) e, após conversão em fibras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Fotografia 2b), dispostas axialmente. Tais fibras são associadas aos vasos condutores (floema e xilema). A anatomia das fibras de sisal é caracterizada por uma composição multicelular, com pequenas células elementares unidas e dispostas longitudinalmente (MARTINS; JOEKES, 2003, MURHERJEE; SATYANARAYANA, 1984). Essas células agem como reforço para a matriz ligno-celulósica. Após a conversão em  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , assim como no ratã e no pinheiro, as características anatômicas das fibras de sisal foram mantidas e sua morfologia celular bem reproduzida. Os vasos condutores podem ser claramente identificados na Fotografia 2b.

Esse processo permitiu a obtenção de fibras ocas, vasculares e com estrutura celular, que podem ser potencialmente aplicadas em processos de filtração ou como reforço na confecção de materiais compósitos.

### 3.2.2 Fibras de $\text{SiC}$

O  $\text{SiC}$  pode ser sintetizado por meio da redução carbotérmica da sílica pelo carbono, resultante da decomposição de compostos orgânicos, que envolve as seguintes reações (a temperaturas superiores a  $1.100\text{ }^\circ\text{C}$  e atmosfera inerte):

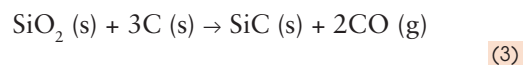
Formação de  $\text{SiO}$  e reação de  $\text{SiO}$  com carbono:



Fotografia 2: Micrografias feitas por meio de MEV de fibras de: a) sisal pirolisada e b)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  biomórfica

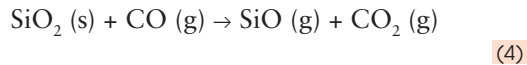
Fonte: O autor.

Assim, a seguinte equação expressa a reação de redução carbotérmica da sílica:

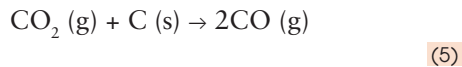


Além disso, pode ocorrer a formação de  $\text{SiO}$  a partir da reação da sílica com  $\text{CO}$  liberado pela reação (3), de acordo com a seguinte reação:

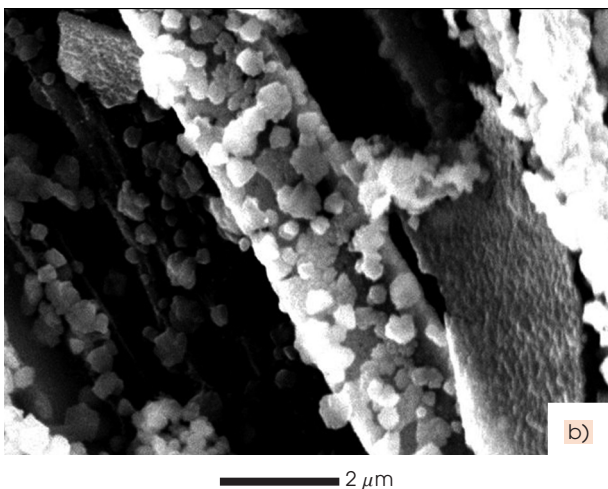
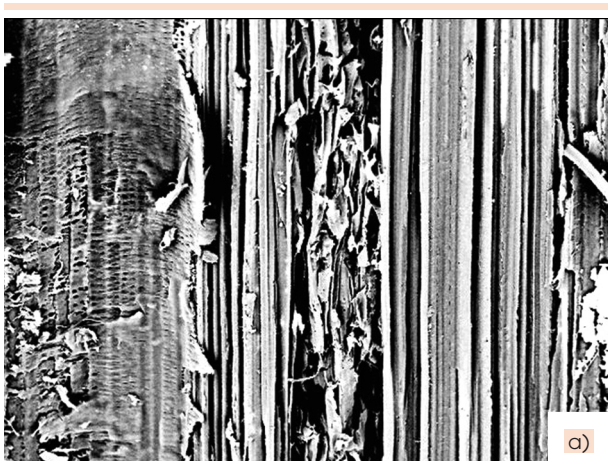




O  $\text{CO}_2$  formado pela reação (4) reage com carbono, formando CO, de acordo com a reação:



A Fotografia 3 apresenta micrografias obtidas por MEV de bambu pirolisado (Fotografia 3a) e após redução carbotérmica a 1.500 °C, durante quatro horas, em argônio (Fotografia 3b).



**Fotografia 3: Micrografias obtidas por MEV: a) bambu pirolisado; b) fibras de SiC após redução carbotérmica a 1.500 °C, durante quatro horas, em argônio**

Fonte: O autor.

Observa-se que houve a formação de partículas de SiC por meio da redução carbotérmica da sílica, indicando uma possível coalescência do SiC, como previamente relatado (KRISHNARAO; GODKHINDI; CHAKRABORTY, 1992). Pode-se constatar na Fotografia 3b que as partículas que recobrem as fibras de carbono estão separadas por vazios. Nessa figura, a fibra possui diâmetro aproximado de 2  $\mu\text{m}$  e é formada por grãos homogêneos de SiC com tamanhos na faixa de 0,5 a 1  $\mu\text{m}$ .

## 4 Considerações finais

Materiais cerâmicos foram produzidos com características microestruturais semelhantes às dos precursores naturais utilizados como modelos.

Fibras de C e SiC foram obtidas a partir da estrutura do bambu. As fibras naturais contêm sílica, distribuída ao longo delas. Por meio da redução carbotérmica dessa sílica, obtiveram-se partículas de SiC.

Fibras e estruturas celulares biomórficas com porosidade uniaxial e tamanho de poros na faixa micrométrica foram produzidas a partir da infiltração de vapor alumínio em pré-formados de ratã, pinheiro e sisal pirolisados e subsequente oxidação. A alumina biomórfica obtida, altamente porosa, manteve as características morfológicas da planta original no nível micrométrico. O processo de conversão descrito permite a produção de cerâmicas microestruturadas, porosas à base de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tanto de pré-formados porosos de carbono biológicos quanto de sintéticos.

A biodiversidade de plantas naturais do Brasil oferece uma vasta variedade de microestruturas e morfologias celulares que podem ser convertidas em materiais cerâmicos.

Os materiais cerâmicos obtidos apresentam grande potencial para a fabricação de materiais compostos com aplicações em tecnologia aeronáutica.



## Advanced materials inspired in the nature: cellular structures, fibers and composites

Biomodeling is a recently developed technology to manufacture ceramics out of natural structures. After processing, the resulting material exhibits a cellular structure similar to the original. Biomimetic fibers of SiC were produced from bamboo, by means of the carbon-thermic reduction of silic naturally present. Pieces of bamboo when submitted to pyrolysis at 1,500 Celsius degrees (°C) in argon atmosphere promote the reaction between silica and carbon. It generates biomimetic alumina by the vacuum infiltration of aluminium steam in pyrolyzed pre-formed of rattan, pine tree, sisal agave and subsequent oxidation. During vacuum infiltration at 1,600 °C, bicarbonate and aluminium steam reacted forming  $Al_4C_3$  totally converted in  $Al_2O_3$ . The biomimetic alumina obtained kept the morphologic characteristics of the original plants on the micrometric level. The microstructural and morphologic characterizations of the biomimetic ceramics were performed by electronic microscopy sweeping, x-ray diffractometry and helium pycnometry.

**Key words:** Advanced ceramics. Biomodeling. Biomimetic. Cellular materials.

## Notas

- 1 O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Volkswagen-Alemanha (sob contrato nº 1/73043) pelo suporte financeiro.
- 2 “In spite of the rapid introduction of wood substitutes, new uses are being constantly found for wood [...]”, do original em inglês.

## Referências

- ALVAREZ, V.; VÁZQUEZ, A.; BERNAL, C. Effect of microstructure on the tensile and fracture properties of sisal fiber/starch-based composites. *Journal of Composite Materials*, Los Angeles, v. 40, n. 1, p. 21-35, 2006.
- BISANDA, E. T. N.; ANSELL, M. P. Properties of sisal-CNSL composites. *Journal of Materials Science*, Amsterdã, v. 27, n. 6, p. 1.690-1.700, 1992.
- BYRNE, C. E.; NAGLE, D. C. Cellulose derived composites: a new method for materials processing. *Materials Research Innovations*, Berlin, v. 1, n. 3, p. 137-144, 1997.
- CALVERT, P. Biomimetic ceramic and composites. *Materials Research Bulletin*, Piscataway, v. 17, p. 37-40, 1992.
- CAO, J.; RAMBO, C. R.; SIEBER, H. Manufacturing of microcellular, biomimetic oxide ceramics from native pine wood. *Ceramics International*, Faenza, v. 30, n. 7, p. 1.967-1.970, 2004.
- CAO, J. et al. Manufacturing of biomimetic oxide ceramics from pine wood. *Journal of Porous Materials*, Amsterdã, v. 1, p. 163-172, 2004.
- CARNELLI, A. L.; MADELLA, M.; THEURILLAT, J-P. Biogenic silica production in selected alpine plant species and plant communities. *Annals of Botany*, Oxford, v. 87, n. 4, p. 425-434, 2001.
- CARVALHO, R. F. *Compósitos de fibra de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira*. 2005. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)– Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-10062005-184350/publico/tesericardo.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2006.
- GREIL, P. Biomimetic ceramics from lignocellulosics. *Journal of the European Ceramic Society*, Oxford, v. 21, p. 105-118, 2001.
- \_\_\_\_\_; LIFKA, T.; KAINDL, A. Biomimetic cellular silicon carbide ceramics from wood: I. processing and microstructure. *Journal of the European Ceramic Society*, Oxford, v. 18, p. 1.961-1.973, 1998.
- HAIGLER, C. H. The functions and biogenesis of native cellulose. In: NEVELL, T. P.; ZERONIAN, S. H. (Ed.). *Cellulose Chemistry and its Applications*. 1. ed. Chichester: Ellis Horwood, 1985. p. 30-83.
- HEUER, A. H. et al. Innovative materials processing strategies: a biomimetic approach. *Science*, Nova York, v. 255, n. 5048, p. 1.098-1.105, 1992.
- JAIN, S.; KUMAR, R.; JINDAL, U. C. Mechanical behaviour of bamboo and bamboo composite. *Journal of Materials Science*, Amsterdã, v. 27, n. 17, p. 4.598-4.604, 1992.



- KRISHNARAO, R. V.; GODKHINDI, M. M.; CHAKRABORTY, M. Maximisation of SiC whisker yield during the pyrolysis of burnt rice husks. *Journal of Materials Science*, Amsterdã, v. 27, n. 5, p. 1.227-1.230, 1992.
- LIESE, W. Bamboos: biology, silvics, properties, utilization. In: \_\_\_\_\_. *Gesellschaft Technische Zusammenarbeit*. 1. ed. Eschborn: GTZ, 1985. v. 180.
- MARTINS, M. A.; JOEKES, I. Tire rubber-sisal composites: effect of mercerization and acetylation on reinforcement. *Journal of Applied Polymer Science*, Cleveland, v. 8, n. 9, p. 2.507-2.515, 2003.
- MURHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. Structure and properties of some vegetable fibres, part 1. Sisal fibre. *Journal of Materials Science*, Amsterdã, v. 19, n. 12, p. 3.925-3.934, 1984.
- OTA, T. et al. Biomimetic process for producing SiC wood. *Journal of the American Ceramic Society*, Malden, v. 78, n. 12, p. 3.409-3.411, 1995.
- \_\_\_\_\_. et al. Porous titania ceramic prepared by mimicking silicified wood. *Journal of the American Ceramic Society*, Malden, v. 83, p. 1.521-1.523, 2000.
- PATEL, M.; PADHI, B. K. Production of alumina fibre through jute fibre substrate. *Journal of Materials Science*, Amsterdã, v. 25, n. 2, p. 1.335-1.343, 1990.
- RAMBO, C. R.; CAO, J.; SIEBER, H. Preparation and properties of highly porous, biomorphic YSZ ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, Tai'-Nan, v. 87, n. 2-3, p. 345-352, 2004.
- \_\_\_\_\_.; MARTINELLI, J. M. Synthesis and characterization of SiC from bamboo. *Key Engineering Materials*, Sydney, v. 189-191, p. 9-15, 2001.
- \_\_\_\_\_.; SIEBER, H. Novel synthetic route to biomorphic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics. *Advanced Materials*, Weinheim, v. 17, n. 8, p. 1.088-1.091, 2005.
- SIEBER, H. Gas phase processing of porous, biomorphic SiC ceramics. *Key Engineering Materials*, Sydney, v. 206-213, p. 2.013-2.016, 2002.
- \_\_\_\_\_. et al. Light-weight cellular ceramics from biologically-derived preforms, cfi/Ber. *DKG*, Berlim, v. 77, p. 21-24, 2000.
- SIEBER, H. et al. Manufacturing of porous oxide ceramics by replication of plant morphologies. *Key Engineering Materials*, Sydney, v. 206-213, p. 2.009-2.212, 2002.
- SOUSA, E. et al. LZSA glass ceramic foams prepared by replication process. *Advances in Applied Ceramics*, Londres, v. 104, n. 1, p. 22-29, 2005. Disponível em: <<http://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/maney/17436753/v104n1/s5.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2006.
- TOLÊDO FILHO, R. D. et al. The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 245-256, 1999. Disponível em: <<http://agriambi.com.br/revista/v3n2/245.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2006.
- VINCENT, J. F. V.; CURREY, J. D. *The mechanical Properties of Biological Materials*. 1. ed. Londres: Cambridge University Press, 1980. v. 34.
- VOGLI, E. Conversion of Oak to Cellular Silicon Carbide Ceramic by Gas-Phase reaction with Silicon Monoxide. *Journal of the American Ceramic Society*, Malden, v. 84, n. 6, p. 1.236-1.240, 2001.
- \_\_\_\_\_.; SIEBER, H.; GREIL, P. Biomorphic SiC-ceramic prepared by Si-gas phase infiltration of wood. *Journal of the European Ceramic Society*, Oxford, v. 22, p. 2.663-2.668, 2002.
- VOGT, U.; HERZOG, A.; KLINGNER, R. Porous SiC ceramics with oriented structure from natural materials. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPOSITES, ADVANCED CERAMICS, MATERIALS, AND STRUCTURES: B, 26. *Proceedings Of Ceramic Engineering And Science*, v. 23, n. 4, p. 219-226, 2002.
- ZHOU, X. P. et al. Reinforcement of polypropylene using sisal fibers grafted with poly (methyl methacrylate). *Journal of Applied Polymer Science*, Cleveland, v. 8, n. 8, p. 1.055-1.064, 2003.
- ZOLLFRANK, C. et al. Manufacturing of anisotropic ceramics from preceramic polymer infiltrated wood. *Ceramic Transactions*, Westerville, v. 129, p. 43-50, 2002.

Recebido em: 23 jan. 2006 / aprovado em: 2 abr. 2006

**Para referenciar este texto**

RAMBO, C. R. Materiais avançados inspirados na natureza: estruturas celulares, fibras e compósitos. *Exacta*, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 95-103, jan./jun. 2006.