



Rem: Revista Escola de Minas

ISSN: 0370-4467

editor@rem.com.br

Escola de Minas

Brasil

Oliveira Alves, Joner; Zhuo, Chuanwei; Levendis, Yiannis Angelo; Soares Tenório, Jorge Alberto

Síntese de nanotubos de carbono a partir do bagaço da cana-de-açúcar

Rem: Revista Escola de Minas, vol. 65, núm. 3, julio-septiembre, 2012, pp. 313-318

Escola de Minas

Ouro Preto, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56424723006>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Síntese de nanotubos de carbono a partir do bagaço da cana-de-açúcar

Synthesis of carbon nanotubes from sugarcane bagasse

Joner Oliveira Alves

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais,
Pesquisador da Aperam South America e
Professor do Centro Universitário do Leste de
Minas Gerais (UnilesteMG)
joner.alves@aperam.com

Chuanwei Zhuo

Mestre em Engenharia Mecânica,
Doutorando da Northeastern University (EUA)
zhuo.c@husky.neu.edu

Yiannis Angelo Levendis

Doutor em Engenharia Ambiental,
Professor Emérito da Northeastern University
(EUA)
y.levendis@neu.edu

Jorge Alberto Soares Tenório

Doutor em Engenharia Metalúrgica,
Professor Titular da Universidade de São Paulo
jtenorio@usp.br

Resumo

A tradicional produção de açúcar, associada à crescente produção de etanol, faz da indústria sucroalcooleira um dos principais segmentos da economia brasileira. As indústrias brasileiras de açúcar e álcool processaram cerca de 630 milhões de toneladas de cana em 2009, gerando, aproximadamente, 142 milhões de toneladas de bagaço. Este trabalho apresenta uma possibilidade de destinação para o bagaço da cana através da queima controlada associada à síntese de nanotubos de carbono (CNTs), materiais que possuem inúmeras possibilidades de aplicações tecnológicas devido as suas excepcionais propriedades. Foi utilizado o processo de pirólise a 1000°C associado a um sistema catalisador, visando à recuperação dos gases gerados como matéria-prima para a síntese dos CNTs. As emissões gasosas foram analisadas por cromatografia e os materiais produzidos foram caracterizados com o emprego de MEV, MET, TGA e espectroscopia Raman. Os resultados mostraram que o uso do catalisador resultou na diminuição das emissões gasosas. Nanotubos de carbono com comprimentos de 10 a 40 µm e diâmetros entre 20 e 50 nm foram produzidos.

Palavras-chave: Nanotubos de carbono, etanol, cana-de-açúcar, pirólise, reciclagem.

Abstract

The traditional sugar production associated with the growing ethanol production makes the sugarcane industry one of the main segments of the Brazilian economy; together the Brazilian industries of sugar and ethanol processed about 630 million tons of sugarcane in 2009, which generated approximately 142 million tons of bagasse. This work presents an economically and environmentally viable solution for the bagasse disposal through the controlled burn associated with the synthesis of carbon nanotubes (CNTs), materials that have a wide range of potential technological applications due to its exceptional properties. The pyrolysis process at 1000°C associated with a catalyst system were used to recover the generated gases as raw material for the synthesis of CNTs. Gaseous emissions were analyzed by chromatography and the produced materials were characterized with the use of SEM, TEM, TGA and Raman spectroscopy. Results showed that the catalyst application resulted in the reduction of gaseous emissions. Carbon nanotubes with lengths of 10-40 µm and diameters in the range of 20-50 nm were produced.

Keywords: Carbon nanotubes, ethanol, sugarcane, pyrolysis, recycling.

1. Introdução

A tradicional produção de açúcar, associada à crescente produção de etanol, faz da indústria sucroalcooleira um dos principais segmentos da economia brasileira. A indústria brasileira é responsável por cerca de 50% das exportações mundiais de açúcar e detém a liderança absoluta na produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar (Porto et al., 2010).

A redução dos gases do efeito estufa tem sido amplamente discutida devido ao aquecimento global. O emprego do etanol, em substituição aos combustíveis fósseis, é considerado uma das principais medidas a serem adotadas, uma vez que esses combustíveis são responsáveis por 73% da produção de CO₂ (Hoogwijk et al., 2009). Segundo a Agência Internacional de Energia - AIE, a oferta global de biocombustíveis terá aumento de 190 mil barris por dia em 2010, atingindo 1,8 milhões de barris diários (IEA, 2010). A fermentação é o principal processo empregado na indústria sucroalcooleira e, durante essa etapa, é gerado um resíduo conhecido como bagaço da cana. Aproximadamente, 225 kg desse resíduo são gerados para cada 1000 kg de cana inserida no processo (Mckendry, 2002; Santos & Tenório, 2010). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, a produção brasileira de etanol,

em 2009, foi de, aproximadamente, 28 bilhões de litros, demandando 350 milhões de toneladas de cana e gerando cerca de 79 milhões de toneladas de bagaço. Os números da geração desse resíduo são ainda maiores quando considerada a cana utilizada na produção de açúcar. As indústrias brasileiras de açúcar e álcool processaram cerca de 630 milhões de toneladas de cana, em 2009, gerando, aproximadamente, 142 milhões de toneladas de bagaço (Porto et al., 2010).

O bagaço da cana-de-açúcar tem conteúdo energético de 17 MJ/kg, podendo ser queimado em caldeiras, para produzir energia elétrica e vapor, sendo este um processo economicamente eficiente e com baixos índices de poluição (Baxter, 2004; Mckendry, 2002). O presente estudo teve como objetivo a inserção de um sistema catalisador no processo da queima do bagaço, visando, além da tradicional geração de energia, a uma diminuição das emissões gasosas e à produção de nanotubos de carbono.

A nanotecnologia tem despertado o interesse de diversas áreas devido às enormes possibilidades de aplicações. Os produtos que empregam a nanotecnologia possuem mercado estimado, para 2010, de US\$11 trilhões, sendo que US\$340 bilhões são correspondentes apenas aos nanomateriais, como, por exemplo, os

catalisadores para automóveis, materiais para gravação magnética e componentes para protetores solares (Pitkethly, 2003).

Entre os produtos de nanotecnologia, os nanotubos de carbono (CNTs) destacam-se como os mais promissores. Os CNTs foram descobertos por Iijima, no início da década de 90. Esses materiais são formados por estruturas cilíndricas constituídas de átomos de carbono com graus estruturais na ordem de nanômetros (10⁻⁹ m) (IJIMA, 1991). Os nanotubos de carbono possuem inúmeras possibilidades de aplicações tecnológicas, devido às suas excepcionais propriedades, tais como alta resistência química, resistência à oxidação e à temperatura, baixa densidade, transporte elétrico, elevada resistência mecânica, flexibilidade e resistência à ruptura (Baughman et al., 2002; See & Harris, 2007). Apesar das excelentes propriedades, o uso dos nanotubos de carbono é limitado, devido ao alto custo de produção. Para reduzir o custo de um produto, duas vias são fundamentais: o barateamento do processo ou a redução do custo das matérias-primas (Alves, 2010; Zhuo et al., 2012). Esse trabalho apresenta soluções nesses dois sentidos, uma metodologia inovadora para a síntese dos nanotubos de carbono e a introdução de uma fonte sustentável e de baixo custo como matéria-prima.

2. Material e métodos

A matéria-prima empregada, nesse trabalho, foi o bagaço da cana-de-açúcar fornecido por uma indústria de etanol, localizada no Estado de São Paulo (Brasil). O material foi recebido na forma de uma fibra seca, tendo sido pulverizado a uma granulometria inferior a 500 µm, antes de ser utilizado. A Tabela 1 apresenta a análise química do bagaço da cana utilizado.

Um cadinho de cerâmica foi utiliza-

do para inserir 4 gramas do material no sistema. O aparato empregado consiste em dois fornos tubulares, em escala laboratorial, ligados por um tubo de quartzo (Figura 1). Nesse trabalho, foi empregado o processo de pirólise, no qual o material é decomposto por tratamento térmico com a ausência de gases oxigenados. A temperatura foi mantida constante a 1000°C e a atmosfera controlada pelo fluxo de N₂.

As amostras foram inseridas no primeiro forno, no qual ocorre o processo de pirólise do material. O efluente da pirólise passa por um filtro com estrutura do tipo colmeia, feito de carvão de sílicio, que retém 97% das partículas submícron, sendo que os gases resultantes entram no segundo forno, onde se encontra o sistema catalisador.

O sistema catalisador é composto por uma tela de aço inoxidável - tipo

C	O	Si	H	Fe	K	Ca	S	Cl	P	N	Outros
50,5	17,5	7,0	6,7	4,8	4,1	2,7	1,7	1,0	0,5	0,3	3,2

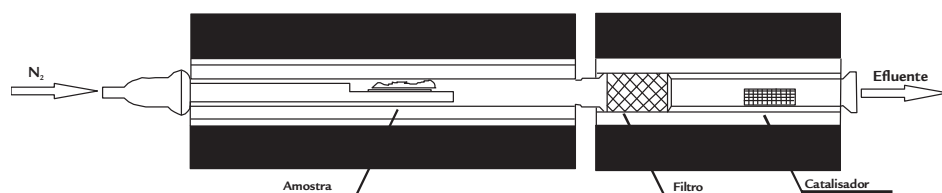


Tabela 1

Análise química do bagaço da cana utilizado no trabalho (em % de peso).

Figura 1

Desenho esquemático do aparato utilizado nos experimentos.

304, uma liga constituída de 71% de ferro, 19% de cromo e 10% de níquel (Gallina, 2010). Essa tela foi utilizada sem pré-tratamentos. Peças de 300 x 100 mm foram enroladas em forma circular com cerca de 40 mm de diâmetro e inseridas de forma paralela à direção do fluxo de gases no forno secundário.

As caracterizações realizadas, nesse trabalho, consistiram em duas frentes: uma análise dos hidrocarbonetos gasosos gerados e um estudo do material sintetizado. Amostras dos efluentes gasosos foram coletadas na saída do

segundo forno e analisadas em um aparelho de cromatografia gasosa modelo HP-6890. Amostras de diferentes regiões da tela metálica foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo Hitachi 4800, e em dois tipos de Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET), um de baixa resolução (modelo JEOL 1010 com tensão de aceleração de 70 kV) e um de alta resolução (modelo JEOL 2010 com tensão de aceleração de 200 kV).

Visando a uma maior obtenção de materiais, os experimentos foram

repetidos dez vezes. Após os experimentos, as telas metálicas foram imersas em etanol, a solução foi submetida à sonicação e a aquecimento, restando apenas um pó fino. Uma amostra com 5,5 mg do material resultante foi analisada por termogravimetria, utilizando-se um TGA modelo HR V5.4A, com fluxo de N_2 e razão de aquecimento de $10^\circ C/min$ até $1000^\circ C$. A espectroscopia Raman foi, também, empregada, utilizando-se de um Micro-Raman RENISHAW com comprimento de onda de 632,8 nm.

3. Resultados e discussão

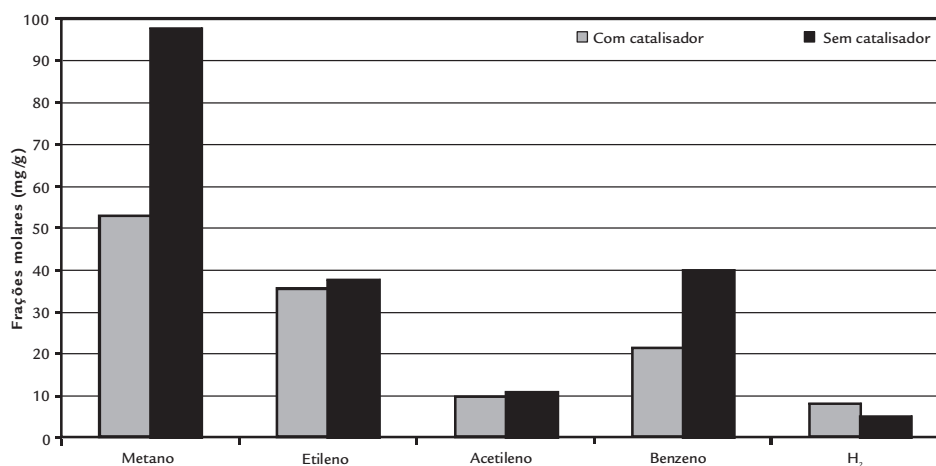
Avaliação das emissões gasosas e da influência do sistema catalisador

Os hidrocarbonetos leves (LHCs) podem ser definidos como compostos orgânicos com baixo peso molecular e que consistem inteiramente de hidrogênio e carbono. Os principais hidrocarbonetos leves gasosos provenientes da queima do bagaço consistiram em metano, etileno,

acetileno e benzeno, sendo que traços de outros compostos também foram detectados: tolueno, etano, propano, propileno, etilacetileno e etilbenzeno. A Figura 2 exibe as emissões registradas com e sem a utilização do sistema catalisador. O emprego das telas metálicas reduziu as

emissões dos hidrocarbonetos e aumentou o volume produzido de H_2 , indicando que uma retenção dos LHCs ocorreu no sistema de catálise, ou seja, os gases gerados, durante a pirólise do bagaço da cana, sofreram reação química, quando em contato com a tela metálica.

Figura 2
Emissões dos LHCs majoritários e H_2 gerados durante a pirólise do bagaço da cana.



O processo de síntese empregado é baseado na deposição química de vapor (CVD), a qual consiste em reações de

desidrogenação térmica (Eq. 1) através do uso de um catalisador composto de um metal de transição empregado para



Baker et al. (1973) estudaram o crescimento de fibras de carbono através da decomposição catalítica de fontes de hidrocarbonetos nas superfícies ativas de metais de transição. Durante esse processo, os hidrocarbonetos são decompostos em carbono e hidrogênio. Tal processo é seguido por uma difusão do carbono sobre a superfície do metal, até a solução tornar-se saturada. A supersaturação da solução resulta na precipitação de partículas sólidas de carbono na superfície do metal.

Outras pesquisas (Kong et al., 1998; Tibbetts, 1983; Zhao et al., 2006) mostraram que os hidrocarbonetos podem ser utilizados como fontes de carbono, na produção de nanotubos de carbono, empregando-se a metodologia CVD.

O metano (CH_4) foi o LHC que apresentou a maior concentração nos experimentos (em torno de 50% do total das emissões). Esse gás é o hidrocarboneto termodinamicamente mais estável, sendo o primeiro a sofrer decomposição no processo de pirólise em

“quebrar” os hidrocarbonetos gasosos em $C_{(sólido)}$ e H_2 (Alves et al., 2011a; See & Harris, 2007).

altas temperaturas (Alves et al., 2011b). Kong et al. (1998) investigaram a utilização do metano como combustível para produzir nanotubos de carbono via CVD com temperatura de $1000^\circ C$, tendo sido produzidos CNTs de alta qualidade. Com base no que foi discutido, é possível afirmar que a recuperação dos hidrocarbonetos gasosos gerados durante a pirólise do bagaço da cana-de-açúcar como fonte de carbono para a síntese de CNTs via CVD é uma tecnologia viável.

Análise microestrutural dos materiais formados

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para uma análise preliminar da formação dos nanomateriais. As Figuras 3-A, 3-B e 3-C apresentam as

imagens MEV dos materiais sintetizados a partir do bagaço da cana. O emprego da microscopia eletrônica de transmissão possibilitou uma análise das estruturas

dos nanomateriais formados. As Figuras 3-D e 3-E apresentam as imagens obtidas com o MET de baixa resolução e a Figura 3-F, com o MET de alta resolução.

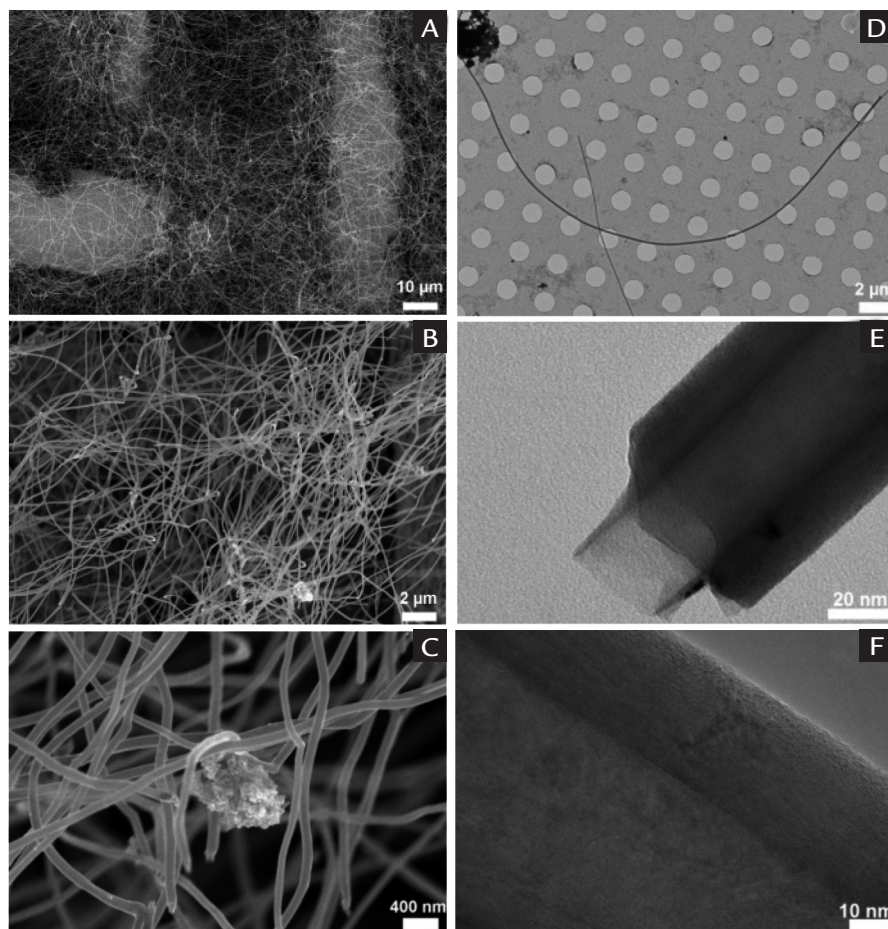


Figura 3
Imagens MEV (A, B e C) e MET (D, E, F)
dos nanomateriais produzidos.

A Figura 3-A exibe a tela catalisadora ao fundo com as ramificações dos nanomateriais impregnados na superfície de um modo não uniforme. Nas Figuras 3-B e 3-C é possível observar uma alta densidade de emaranhados de nanomateriais que abrangem a malha catalisadora, bem como o elevado comprimento dessas fibras (entre 10 e 40 μm). A imagem de MET exibida na Figura 3-D aponta para a formação de fios longos e de algumas impurezas, provavelmente carbo-

no amorfo. A Figura 3-E possibilita uma avaliação da média dos diâmetros dos materiais sintetizados. Foram produzidos nanomateriais com diâmetros entre 20 e 50 nm. Como esperado, as imagens de MET mostraram que os nanomateriais produzidos possuem a forma tubular característica dos nanotubos de carbono.

A Figura 3-F possibilita uma análise da estrutura das paredes dos CNTs produzidos. Foi evidenciada a presença das camadas de grafeno paralelas ao re-

dor de uma cavidade oca. Os CNTs podem ser classificados em nanotubos de carbono de parede simples (NCPS) ou de parede múltiplas (NCPM), sendo que os NCPS são compostos de uma única folha de grafite na forma de um tubo cilíndrico, e os NCPM são formados por um conjunto de nanotubos concêntricos (SEE e HARRIS, 2007). Os CNTs produzidos, nesse trabalho, possuem várias paredes, portanto podem ser classificados como NCPM.

Análise termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica foi utilizada, nesse trabalho, para uma investigação das impurezas presentes no pó obtido após a imersão das telas metálicas na solução de etanol. A Figura 4 exibe a curva TG do material produzido.

O tratamento térmico é uma das alternativas para a purificação dos

CNTs, uma vez que possíveis impurezas degradam-se em temperaturas inferiores do que a desses materiais (Lobach et al., 2002). A curva TG do material produzido apresenta um aumento acelerado na perda de massa, após a temperatura de cerca de 830°C. Tal fato está relacionado à decomposição dos nanomateriais. A perda de aproximadamente 14% da

massa inicial, antes da temperatura atingir 830°C, indica a presença das impurezas presentes no pó recolhido. Essas impurezas são constituídas, basicamente, por carbono amorfo. Portanto é possível afirmar que, aproximadamente, 86% do material coletado, no sistema catalisador, é composto por estruturas cristalinas de carbono.

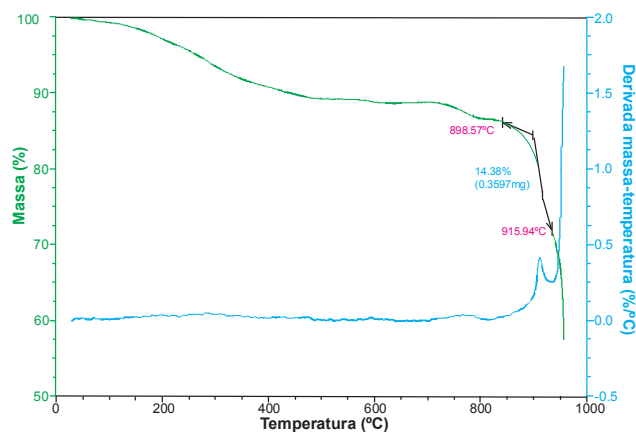


Figura 4
Curva TG do material
removido da tela catalisadora.

Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman permite a diferenciação entre as diferentes formas alotrópicas do carbono, tais como nanotubos, grafite ou carbono amorfo. No caso dos nanotubos de carbono, os modos vibracionais tangenciais são responsáveis pela banda G com faixa de frequência de cerca de 1.500-1.600 cm^{-1} ,

sendo que tal frequência está associada a camadas gráficas ordenadas. A banda D, visualizada entre 1.200 e 1.400 cm^{-1} , é atribuída à presença de imperfeições estruturais, como defeitos ou impurezas no material analisado. O pico G é atribuído às ligações de estiramento dos pares de átomos sp^2 em anéis ou cadeias, enquan-

to que o pico D é relatado aos modos de respiração dos átomos sp^3 nos anéis. A Figura 5 mostra o espectro Raman do material produzido, sendo que a presença das bandas G e D são coerentes com a forma estrutural dos nanotubos de carbono (Dresselhaus et al., 2005; Eklund et al., 1995).

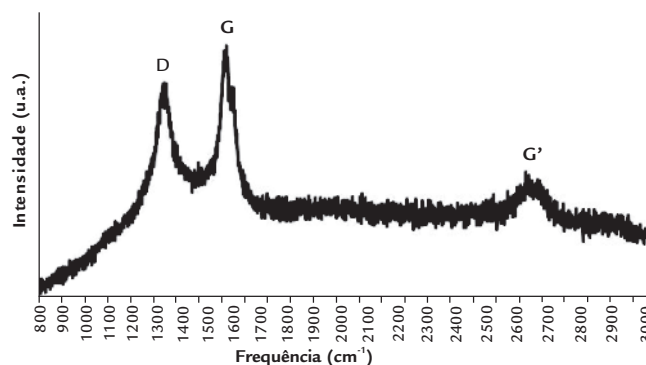


Figura 5
Espectro Raman dos
materiais produzidos.

Uma banda de segunda ordem apresentada na faixa de frequência 2500-2700 cm^{-1} (pico G') envolve dois fônons. A presença dessa banda evidencia a presença de camadas gráficas paralelas, o que é consistente com

a imagem obtida com o microscópio eletrônico de transmissão com alta resolução (Figura 3-F). Geralmente, as estruturas dos CNTs podem ser avaliadas pela razão entre as intensidades das bandas G e D, sendo que uma maior

razão I_G/I_D indica um maior grau de ordenamento estrutural (Dresselhaus et al., 2005; Thomsen, 2000). O material sintetizado, a partir dos gases de pirólise do bagaço da cana, apresentou uma razão I_G/I_D de 1,25.

4. Conclusões

A associação do processo de catálise ao de pirólise representa uma solução inovadora para a destinação do bagaço da cana-de-açúcar e para a produção de nanomateriais. O emprego da tela de aço inoxidável ocasionou uma redução das emissões de gases nocivos ao meio ambiente, tais como o metano, hidrocarboneto que apresentou as

maiores quedas nas taxas de emissões. Os resultados apontaram para o fato de que o material coletado, no sistema catalisador, é constituído por, aproximadamente, 86% de nanomateriais, sendo que a espectroscopia Raman comprovou que esses materiais possuem estrutura similar aos nanotubos de carbono. Foram produzidas altas densidades de

emaranhados de nanotubos de carbono de paredes múltiplas com diâmetros de 20 a 50 nm e comprimentos na faixa de 10 a 40 μm . Portanto o uso do bagaço da cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de nanotubos de carbono mostrou ser bastante satisfatório e uma área interessante para investimentos futuros.

5. Agradecimentos

Autores agradecem ao CNPq, pelo financiamento do período do D.Sc. Jonei Alves na Northeastern University (EUA),

à CAPES, pelo suporte ao projeto “Novos processos e produtos de nanotecnologia aplicados ao meio ambiente” (edita

04/CII-2008 - Rede Nanobiotec-Brasil) e à National Science Foundation - NSF (EUA), pelo apoio financeiro.

6. Referências bibliográficas

- ALVES, J. O. Síntese de nanotubos de carbono através do uso do bagaço da cana-de-açúcar como matéria-prima. In: UNESCO, MBC, RECYT/ MERCOSUL, CNPq. (Org.). *Nanotecnologia para o mercosul: edição 2010 do prêmio Mercosul de ciência e tecnologia*. Brasília: UNESCO, 2010. p. 57-74.
- ALVES, J. O., ZHUO, C., LEVENDIS, Y. A., TENÓRIO, J. A. S. Catalytic conversion of wastes from the bioethanol production into carbon nanomaterials. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 106, n. 3-4, p. 433-444, 2011a.
- ALVES, J. O., ZHUO, C., LEVENDIS, Y. A., TENÓRIO, J. A. S. Microstructural analysis of carbon nanomaterials produced from pyrolysis/combustion of styrene-butadiene-rubber (SBR). *Materials Research*, v. 14, n. 4, 2011b.
- BAKER, R. T. K., HARRIS, P. S., THOMAS, R. B., WAITE, R. J. Formation of filamentous carbon from iron, cobalt and chromium catalyzed decomposition of acetylene. *Journal of Catalysis*, v. 30, n. 1, p. 86-95, 1973.
- BAUGHMAN, R. H., ZAKHIDOV, A. A., HEER, W. A. Carbon nanotubes - the route toward applications. *Science*, v. 297, p. 787-792, 2002.
- BAXTER, L. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*, v. 84, p. 1295-1302, 2004.
- DRESSELHAUS, M. S., DRESSELHAUS, G., SAITO, R., JORIO, A. Raman spectroscopy of carbon nanotubes. *Physics Reports*, v. 409, p. 47-99, 2005.
- EKLUND, P. C., HOLDEN, J. M., JISHI, R. A. Vibrational modes of carbon nanotubes: spectroscopy and theory. *Carbon*, v. 33, p. 959-972, 1995.
- ENDO, M., KIM, Y. A., FUKAI, Y., HAYASHI, T., TERRONES, M., TERRONES, H., DRESSELHAUS, M. S. Comparison study of semi-crystalline and highly crystalline multiwalled carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, v. 79, n. 10, p. 1531-1533, 2001.
- GALLINA, A. L., STROPARO, E. C., CUNHA, M. T., RODRIGUES, P. R. P. A corrosão do aço inoxidável austenítico 304 em biodiesel. *REM - Revista Escola de Minas*, v. 63, p. 71-75, 2010.
- HOOGWIJK, M., FAAIJ, A., VRIES, B., TURKENBURG, W. Exploration of regional and global cost-supply curves of biomass energy from short-rotation crops at abandoned cropland and rest land under four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 1, p. 26-43, 2009.
- IEA - International Energy Agency. *Statistics & Balances*. Disponível em <<http://www.iea.org/stats/index.asp>>, acesso em 30/04/2010.
- IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, v. 354, p. 56-58, 1991.
- KONG J., CASSELL A. M., DAI H. Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes. *Chemical Physics Letters*, v. 292, p. 567-574, 1998.
- LOBACH, A. S., SPITSINA, N. G., TEREKHOV, S. V., OBRAZTSOVA, E. D. Comparative analysis of various methods of purification of single-walled carbon nanotubes. *Physics of the Solid State*, v. 44, n. 3, p. 475-477, 2002.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, v. 83, n. 1, p. 47-54, 2002.
- PITKETHLY, M. J. Nanoparticles as building blocks. *Nano Today*, v. 36, p. 36-42, 2003.
- PORTO, S. I., SILVA, A. C. P., OLIVEIRA, E. P. *Relatório da produção brasileira de cana-de-açúcar*. CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/1cana_de_acucar>, acesso em 11/01/2010.
- SANTOS, L., TENÓRIO, J. A. S. Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar. *REM - Revista Escola de Minas*, v. 63, n.1, p. 179-184, 2010.
- SEE, C. H., HARRIS, A. T. A review of carbon nanotube synthesis via fluidized-bed chemical vapor deposition. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 46, n. 4, p. 997-1012, 2007.
- TIBBETTS G. G. Carbon fibers produced by pyrolysis of natural gas in stainless steel tubes. *Applied Physics Letters*, v. 42, n. 8, p. 666-668, 1983.
- THOMSEN C., REICH S. Double resonant Raman scattering in graphite. *Physics Review Letters*, v. 85, p. 5214-5217, 2000.
- ZHAO N., HE C., JIANG Z., LI J., LI Y. Fabrication and growth mechanism of carbon nanotubes by catalytic chemical vapor deposition. *Materials Letters*, v. 60, n. 2, p. 159-163, 2006.
- ZHUO C., ALVES J. O., TENÓRIO J. A. S., LEVENDIS Y. A. Synthesis of carbon nanomaterials through up-cycling agricultural and municipal solid wastes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 51, p. 2922-2930, 2012.