



Do resíduo a energia: desenvolvimento de biocarvão a partir do bagaço de cana-de-açúcar para anodos de baterias de íons-lítio

Samara S. Garcia^{1*}(G), Laisa S. Gomes¹(PG), Igor M. Gonçalves¹(PG), Marcio H. P. Barbosa² (PQ), Reinaldo F. Teófilo¹(PQ)

Universidade Federal de Viçosa, ¹Departamento de Química, ²Departamento de Agronomia, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 36570-900.

*Email: samara.garcia@ufv.br

RESUMO

A demanda por baterias de íons-lítio sustentáveis impulsiona a busca por anodos alternativos ao grafite. Este trabalho sintetizou materiais carbonáceos a partir da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar com ativação química por KOH em diferentes razões mássicas. As amostras foram caracterizadas por XRD, FTIR e SEM, revelando estrutura amorfa, alta porosidade e funcionalização superficial. A ativação com razão 2:1 (KOH:biomassa) gerou um carbono amorfo com propriedades favoráveis ao armazenamento reversível de íons lítio, por mecanismos diferentes da intercalação no grafite. Os resultados demonstram o potencial de resíduos lignocelulósicos como fontes renováveis para anodos sustentáveis em baterias de próxima geração.

Palavras-chave: biomassa, biocarvão, baterias, pirólise, caracterização.

Introdução

As baterias recarregáveis de íons-lítio (LIBs) são amplamente usadas em eletrônicos, veículos elétricos e sistemas industriais, mas anodos convencionais como grafite e negro de fumo apresentam limitações de desempenho e custo elevado (1). Assim, anodos de fontes renováveis têm ganhado interesse para aumentar a sustentabilidade das LIBs. Biocarvões de biomassa lignocelulósica oferecem alta porosidade, área superficial e heteroátomos, favorecendo o armazenamento de íons lítio (2). A ativação com KOH antes da pirólise melhora ainda mais essas propriedades, aumentando a desordem estrutural e a condutividade (3). Este estudo apresenta a síntese e caracterização *ex-situ* de materiais carbonáceos derivados do bagaço de cana-de-açúcar, um resíduo de baixo custo com potencial para aplicações como anodo em LIBs.

Experimental

Preparo dos precursores e ativação química:

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado foi fornecido pelo Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar (PMGCA) da UFV. A biomassa foi seca em estufa a 60 °C por 24 horas, moída em moinho de bolas a 350 RPM e peneirada em malha de 200 mesh. Foram utilizados 40 g de biomassa, dispersos em 250 mL de solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH, Synth), nas proporções mássicas KOH:biomassa de 2:1 e 1:2. As misturas foram agitadas por 2 horas e deixadas em repouso por 12 horas. Foram secas a 105 °C por 24 horas e submetidas à pirólise. Para avaliar o efeito do meio aquoso, testou-se também uma rota seca, na qual KOH e biomassa foram homogeneizados

diretamente em moinho de bolas, nas mesmas proporções.

Síntese dos materiais carbonáceos:

A pirólise foi realizada em mufla sob atmosfera de nitrogênio, a 950 °C por 1 hora, com taxa de aquecimento de 5 °C/min. Após o tratamento térmico, os materiais foram lavados com solução de HCl 0,2 mol/L e água deionizada até pH neutro, e secos a 105 °C.

Caracterização ex-situ:

As amostras foram caracterizadas por Difração de Raios X (XRD) em um difratômetro Bruker D8 Discover, com varredura no intervalo de 2 θ entre 10° e 70° e passo de 0,05°. A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi usada para identificar grupos funcionais superficiais, com espectros obtidos na faixa de 4000-500 cm⁻¹, resolução de 4 cm⁻¹ e 64 varreduras. A morfologia e a estrutura porosa foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) em microscópio JEOL JSM-6010LA a 15 kV, com amostras metalizadas por *sputtering*. As características estruturais e morfológicas foram comparadas com grafite comercial (Grafite, Sigma) para avaliar o potencial como anodos em baterias de íons-lítio.

Resultados e Discussão

A análise por XRD revelou diferenças estruturais marcantes entre os biocarvões sintetizados e a amostra de grafite comercial. O grafite apresentou picos intensos e bem definidos, com destaque para a reflexão (002) próxima a 26°, característica de uma estrutura gráfitica altamente cristalina. Em contraste, as amostras pirolisadas ativadas com razão mássica KOH:biomassa de 2:1 exibiram uma banda (002) larga e sem picos distintos, indicando uma estrutura predominantemente amorfa, típica de biocarvões. Essa ausência de ordem de longo alcance favorece o



armazenamento reversível de íons lítio por mecanismos distintos da intercalação convencional observada no grafite, como preenchimento de poros e adsorção superficial. Já as amostras com razão 1:2 apresentaram sinais de difração mais largos, porém com picos cristalinos residuais sobrepostos à banda (002), possivelmente relacionados à presença de sílica (SiO_2) oriunda da biomassa e/ou K_2O residual, sugerindo ativação incompleta e carbonização heterogênea (4).

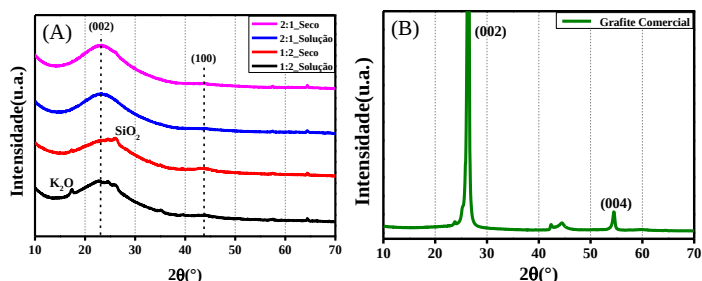


Figura 1. A) Padrões de XRD das amostras de biocarvão obtidas a partir de diferentes tratamentos e B) do grafite comercial.

As imagens de SEM mostraram morfologias distintas entre os materiais. As amostras com razão 2:1, especialmente as ativadas a seco, apresentaram estruturas altamente porosas e irregulares, resultado da decomposição térmica da biomassa e da ativação química com KOH, que favorece a formação de poros durante a carbonização. Em contraste, as amostras 1:2 exibiram morfologia mais compacta e menor porosidade, indicando ativação menos eficaz. O grafite comercial, por sua vez, apresenta estrutura lamelar densa e pouco porosa, enquanto os biocarvões, com estrutura mais aberta e desordenada, favorecem o transporte de íons e o acesso do eletrólito.

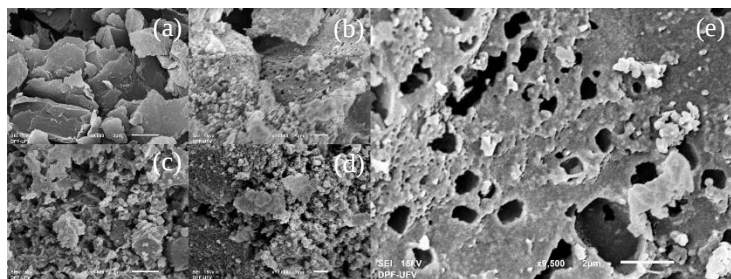


Figura 2. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM) das amostras de biocarvão e do grafite comercial: (a) grafite comercial, (b) 2:1 – solução, (c) 1:2 – seco, (d) 1:2 – solução, (e) 2:1 – seco.

A análise por FTIR evidenciou diferenças significativas na funcionalização superficial dos materiais. O espectro do grafite apresentou baixa presença de grupos funcionais, como esperado para um material altamente cristalino e inerte. Por outro lado, os biocarvões exibiram intensa funcionalização superficial, evidenciada por uma larga banda de estiramento O-H ($\sim 3380 \text{ cm}^{-1}$), significativamente reduzida na amostra ativada a seco com razão 2:1, indicando maior remoção de

compostos hidroxilados durante a pirólise. Uma banda fraca próxima a 2100 cm^{-1} pode estar associada às vibrações do CO_2 , enquanto bandas intensificadas em $\sim 1630 \text{ cm}^{-1}$ (C=O/C=C aromático) e $\sim 1045 \text{ cm}^{-1}$ (C-O) indicam a presença de grupos oxigenados, como ácidos carboxílicos e éteres, especialmente nas amostras ativadas com razão 2:1. Essa funcionalização diversificada pode melhorar a molhabilidade pelo eletrólito e a transferência de carga na interface eletrodo/eletrólito (4).

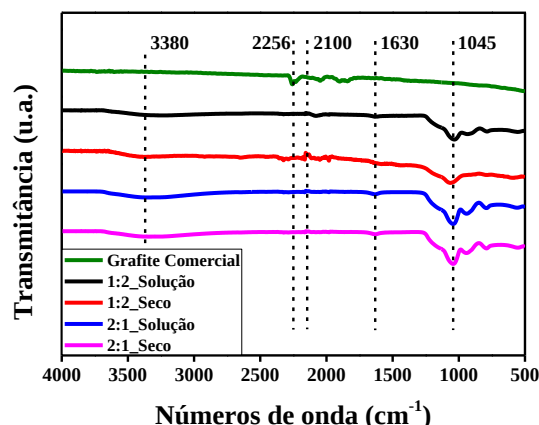


Figura 3. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das amostras de biocarvão obtidas a partir de diferentes tratamentos e do grafite comercial.

Conclusões

A ativação química com KOH foi fundamental para modificar as características estruturais e morfológicas dos biocarvões derivados do bagaço de cana-de-açúcar. A razão KOH:biomassa de 2:1 produziu carbono amorfo com alta porosidade e funcionalização superficial, adequados para armazenamento de íons lítio. Já as amostras 1:2 tiveram menor ativação, com porosidade reduzida e cristalinidade parcial. Comparados ao grafite comercial, os biocarvões exibiram estruturas desordenadas e maior complexidade química, indicando mecanismos alternativos de armazenamento. Esses resultados reforçam o potencial de resíduos lignocelulósicos para anodos sustentáveis em LIBs.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG e à FINEP pelo apoio financeiro.

Referências

1. H. Hossain; M.A. Islam; M.A. Chowdhury; N. Hossain, *Cleaner Energy Syst.* **2024**, 9, 100145.
2. N.S. Seroka; H. Luo; L. Khotseng, *Batteries* **2024**, 10, 144.
3. J. Wang; S. Kaskel, *J. Mater. Chem.* **2012**, 22, 23710–23725.
4. M. Nazbakhsh; S.R. Nabavi; S. Jafarian, *Sustainability* **2025**, 17, 1554.