

ESTUDO QUALITATIVO DO CARVÃO ATIVADO DO MESOCARPO DO COCO VERDE, EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO, A PARTIR DE PLANEJAMENTOS FATORIAIS

Emerson Freitas Jaguaribe

Laboratório de Carvão Ativado – Centro de Tecnologia – Campus I da UFPB - João Pessoa - PB - Brasil. CEP: 58059-900, Fone: (0xx83) 216.7582. Fax: (0xx83) 216.7179, ejaguaribe@uol.com.br

Albuquerque Junior, E.C.

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Química, Laboratório de engenharia ambiental. Rua Professor Avertano Rocha, 297, Bongi. Recife - PE. CEP: 50761-100. Fone: (0xx81) 32281214.

Pimentel, M.F.

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Química, Laboratório de engenharia ambiental. Rua Teresa Mélia s/n, Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-521. Fone: (0xx81) 32718711.

Molica, R.J.R.

Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco - ITEP. Av. Prof. Luís Freire 700, Cidade Universitária. Recife-PE. CEP: 50740-540. Fone: (0xx81) 32724264

Resumo. Carvões ativados são adsorventes de grande interesse e aplicações no mundo moderno. São produzidos quase que exclusivamente de materiais lignocelulósicos. Nesse trabalho avalia-se a influência das variáveis do processo de produção de carvão ativado do mesocarpo do coco verde sobre os principais parâmetros que definem a qualidade destes carvões, através da técnica de planejamentos fatoriais. Os carvões foram produzidos em um único estágio de carbonização e ativação em um reator tubular rotativo de leito fixo. A ativação se deu via física, empregando-se as propriedades oxidantes do vapor d'água. As respostas estudadas foram: a área superficial, obtida pelo método de BET, área de mesoporos, número de iodo, índice de azul de metileno, volume de mesoporos e área de microporos. Os fatores e os níveis considerados no planejamento fatorial foram: a razão de aquecimento (4,68 K/s - 4,75 K/s), tempo de ativação (300 s - 1500 s) e temperatura final de ativação (1023 K - 1123 K). Concluiu-se que a razão de aquecimento não é parâmetro significativo no processo de produção de carvão ativado e que a qualidade do carvão, depende sobre tudo do tempo e da temperatura finais de ativação. O tempo de ativação é a única variável responsável pelo aumento da área de mesoporos.

Palavras-chaves: planejamento fatorial, Carvão ativado, Variáveis do processo de produção, mesocarpo do coco verde, numero de iodo, índice de azul de metileno.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Mattson and Mark (1971), carvões ativados são adsorventes de grande interesse industrial e suas aplicações incluem o tratamento d'água, refino do açúcar, recuperação de metais preciosos, desodorização do ar, etc. A produção de carvão ativado envolve duas etapas: a carbonização do material de partida e a ativação do produto carbonizado. A carbonização consiste de uma decomposição térmica do material carbonáceo, eliminando espécies não carbônicas e produzindo uma massa de carbono fixa com uma estrutura porosa rudimentar, onde muitos poros, extremamente finos e fechados, são formados nesta etapa. Segundo Zhonghua et al (2001), a etapa subsequente chamada de ativação tem o propósito de desobstruir os poros formados na carbonização, aumentando seus diâmetros, além de criar novos poros. A ativação pode ser desenvolvida por meios físicos, pela utilização de CO₂ ou vapor d'água a temperaturas acima de

973 K, ou químicos. De acordo com Abdel-Nasser et al (2001), no caso da ativação química, a carbonização e a ativação são realizadas em uma única etapa pela execução da decomposição térmica do material bruto impregnado com certos agentes químicos como $ZnCl_2$, H_3PO_4 , H_2SO_4 e hidróxidos de metais alcalinos. Este processo ocorre a temperaturas mais baixas, isto é entre 673 e 873 K.

Segundo Boenhorff (1980), a distribuição dos tamanhos dos poros dos carvões, juntamente com sua área superficial interna, é considerada uma das mais importantes propriedades no processo de adsorção. Pelekani and Snoeyink (1999) publicaram em pesquisas recentes que o tamanho dos poros está dividido, de acordo com a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), em macroporos (> 50 nm), mesoporos (2 a 50 nm), microporos secundários ($0,8$ a 2 nm) e microporos primários ($< 0,8$ nm). Baçaoui et al (1998) afirmaram que dependendo das condições de carbonização, ativação e material de partida, o produto obtido poderá ter diferentes características, notadamente em sua estrutura, textura e propriedades superficiais.

Pollard et al (1992) mostram que os carvões ativados podem ser obtidos a partir da madeira, cascas e sementes de frutas, ossos, além de materiais de origem mineral e polímeros sintéticos. Atualmente há uma tendência de se utilizar como material de partida na produção de carvões ativados, subprodutos agrícolas e/ou rejeitos industriais, pelo fato de serem materiais abundantes e renováveis, além de fornecerem carvões de alta qualidade e de baixo custo.

O consumo brasileiro de coco verde chega a mais de um milhão de frutos por ano. O levantamento sistemático da produção agrícola para o ano de 2000 mostrou que o Brasil obteve uma produção de coco verde da ordem de 1.303.411 frutos; estando os Estados da Bahia, Maranhão e Ceará como os maiores produtores brasileiros (disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric> >. Acesso em 20 de dezembro de 2001).

Sabe-se que o mesocarpo do coco verde (parte fibrosa) é um tipo de rejeito agrícola/industrial que não se tem utilidade, ao contrário da sua forma seca que já foi utilizado no passado para a fabricação de calabres navais, tendo em vista sua capacidade de não apodrecer com a água, e vem sendo empregado, hoje em dia, como substrato de solo em cultivos com a técnica da hidropônia, ou para a fabricação de capachos, tecidos para toalhas, ou vestuário.

No presente trabalho investigou-se a influência das variáveis (ou fatores) do processo de produção de carvão ativado proveniente do mesocarpo do coco verde nas propriedades de adsorção deste material. Isto foi feito usando-se a técnica multivariada de planejamentos fatoriais difundida por Barros Neto et al (2001). Segundo Eiras and Andrade (1996), métodos tradicionais univariados de otimização, que permitem variar um só fator de cada vez, mantendo-se fixos todos os outros, são adequados quando os fatores são independentes entre si.

Em sistemas mais complexos, nos quais interações sinérgicas ou antagônicas são comuns, a otimização univariada pode produzir resultados enganosos. Planejamentos fatoriais são baseados na aproximação alternativa multivariada, em que todos os fatores são considerados simultaneamente, e em bases iguais. Estes planejamentos têm a vantagem de prover informações não só a respeito do efeito individual de cada fator na resposta de interesse, mas também das possíveis interações entre todos os fatores. Esta técnica foi recentemente explorada por Baçaoui et al. (1998) e Baçaoui et al. (2001) em pesquisas com carvões ativados provenientes do resíduo industrial da extração do azeite de oliva.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Matéria-prima

Foram preparados carvões ativados a partir de fibras de celulose do mesocarpo do coco verde (*cocos nucifera* L.), coletado no campus I da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. O mesocarpo do coco foi separado do seu endocarpo e cortado em pedaços de dimensões aproximadamente iguais a $4 \cdot 10^{-2}$ m x $3 \cdot 10^{-2}$ m x 10^{-2} m. As amostras foram coletadas e utilizadas no mesmo dia para evitar a perda de água, fermentação ou desenvolvimento de fungos.

2.2. Análise Termogravimétrica

O mesocarpo do coco verde foi finamente dividido em partículas de aproximadamente 1 mm de diâmetro e uma amostra de aproximadamente $9,0 \cdot 10^{-6}$ kg foi colocada em um prato de alumina de uma balança termogravimétrica (SHIMADZU - modelo TGA-50). O material de partida foi aquecido a diferentes razões de aquecimento (4,68, 4,72 e 4,75 K/s) com variação de temperatura de 298 K a 1173 K, em atmosfera de ar.

2.3. Carbonização e ativação

A carbonização e ativação do material de partida foram realizadas em um reator tubular de leito fixo rotativo, aquecido por um forno elétrico (CHINO) com programador de temperatura e razão de aquecimento, especificada no planejamento fatorial. Para a ativação do material carbonizado foi utilizando vapor d'água como agente ativante produzido por uma caldeira elétrica (CHINO) acoplada ao reator, conforme mostra a Fig. (1).

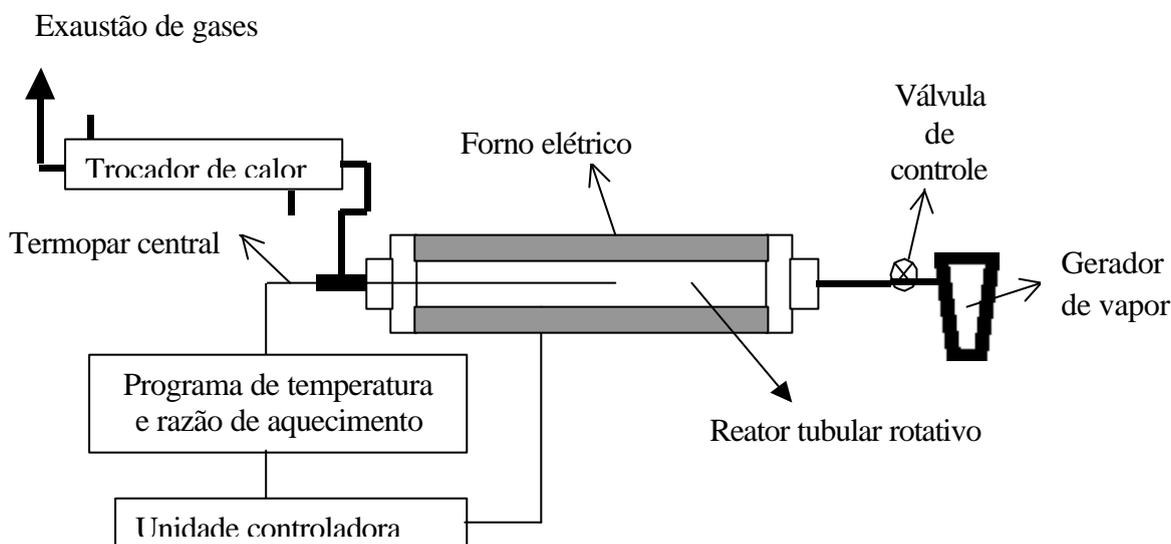


Figura 1. Esquema do sistema de pirólise e ativação do carvão.

O fluxo de vapor d'água que alimenta o reator foi fixado em $2,22 \cdot 10^{-4}$ kg/s. Cerca de 1,890 kg do material de partida, com aproximadamente 76 % p/p de umidade foram carbonizados por batelada. Diferentes programas de pirólise e ativação foram empregados neste estudo. Quatro termopares (três periféricos ao reator e um central) registraram o comportamento das temperaturas do processo, sendo o termopar central, o responsável pela condução dos processos de pirólise e de ativação. A ativação para todos os carvões foi iniciada a 773 K (registrado pelo termopar central). Ao final, o reator foi resfriado à temperatura ambiente e o carvão ativado produzido foi pesado para determinar o rendimento do processo, conforme a Eq. (1):

$$R\% = \frac{\text{massa (kg) de carvão ativado}}{\text{massa (kg) de material bruto}} \times 100 \quad (1)$$

O processamento das amostras de carvão ativado para cada condição experimental, foi conduzido de acordo com os procedimentos da Norma JIS-K 1474 (1991). A partir destas amostras foram realizados os ensaios de adsorção em fase líquida, gasosa e as análises físico-químicas do carvão, sendo antes resfriadas em dessecador com sílica gel por 3600 s.

2.4. Planejamento Fatorial 2³

Três variáveis de processo foram identificadas, em estudos preliminares, como capazes de influenciar a capacidade de adsorção do carvão ativado: o tempo de ativação (t), a razão de aquecimento (R) e a temperatura máxima de ativação (T). Utilizou-se um planejamento fatorial 2³ completo, com experimentos em triplicata no ponto central, de forma a realizar o teste de curvatura e estimar o erro experimental, totalizando, assim, 11 experimentos, como mostra a Tab. (1b). Os níveis das variáveis foram escolhidos mediante estudos prévios e de dados reportados da literatura por Baçaoui et al (1998) e Baçaoui et al (2001). Os níveis do planejamento encontram-se na Tabela 1a, sendo de 300 e 1500 s para o tempo de ativação, 1023 e 1123 K para a temperatura máxima de ativação e razões de aquecimento de 4,68 e 4,75 K/s. As condições experimentais de cada ensaio estão resumidas na Tab. 1b. Os experimentos foram realizados em ordem aleatória e seguindo-se a convenção usual, os dois valores extremos dos níveis dos fatores são identificados com -1 (nível baixo) e +1 (nível alto). As respostas estudadas foram: área superficial, obtida pelo método de BET (U₁), área de mesoporos (U₂), número de iodo (U₃), índice de azul de metileno (U₄), volume de mesoporos (U₅) e área de microporos (U₆).

Tabela 1a. Níveis dos fatores

Fatores	Código das Variáveis	Nível		
		-	central	+
Temperatura final de Ativação (K)	T	1023	1073	1123
Tempo de ativação (s)	t	300	900	1500
Razão de Aquecimento (K/s)	R	4,68	4,72	4,75

Tabela 1b. Matriz de planejamento

Experimento	T	t	R
01	-	-	-
02	+	-	-
03	-	+	-
04	+	+	-
05	-	-	+
06	+	-	+
07	-	+	+
08	+	+	+
09	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

2.5. Área superficial, distribuição e tamanho dos poros

As áreas superficiais e a porosidade das amostras de carvão ativado pulverizado foram determinadas por adsorção gasosa com N₂ e He (1:5) a 77 K. Um analisador de superfície e porosimetria (Micromeritics, ASAP 2000) foi empregado para estas medições. Antes de serem analisadas as amostras foram degaseificadas a 413 K por no mínimo 240 s a um vácuo de 1,34 10⁻² Pa.

A área superficial dos carvões ativados foi calculada empregando-se o método de BET. Os cálculos da área e do volume de microporos e mesoporos foram desenvolvidos utilizando-se o método t-Harkins & Jura e BJH, respectivamente, de acordo com Weeb and Orr Jr (1997).

2.6. Avaliação da capacidade de adsorção em meio líquido

Informações adicionais quanto à distribuição dos tamanhos de poros dos carvões ativados foram obtidas comparando-se as características de adsorção para dois diferentes adsorbatos, o azul de metileno e o iodo. De acordo com Lussier et al (1994), a escolha destas moléculas é justificada por suas propriedades, forma e polaridade, além de serem utilizadas para prever a capacidade do carvão ativado em adsorver micropoluentes em efluentes e fornecer uma estimativa das áreas de microporos e mesoporos do carvão.

Foram utilizados nestes experimentos azul de metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S_3 \cdot 3H_2O$, 99,95%, $PM = 385,9 \text{ mol/g}$, Merck) e iodo (I_2 , 99,9%, $PM = 254,0 \text{ mol/g}$, Reagen) grau analítico. Os referidos experimentos de adsorção foram conduzidos à temperatura de $301 \pm 275 \text{ K}$ sob agitação constante. As concentrações residuais das soluções de iodo e azul de metileno foram determinadas por técnicas de volumetria com tiosulfato de sódio e por espectrofotometria de absorção molecular (espectrofotômetro HP 8453 com arranjo de fotiodo, resolução de 1 nm e tempo de integração de $0,1 \text{ s}$) no comprimento de onda de 665 nm , respectivamente. Foram construídas isotermas de quatro e de três pontos para o iodo e o azul de metileno, respectivamente, ajustando-as ao modelo de Freundlich, conforme determinação da norma JIS – K 1474 (1991).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) e a análise diferencial térmica (DTA) foram usadas para avaliar o comportamento da decomposição pirolítica da celulose, hemicelulose e lignina do mesocarpo do coco verde. Os três termogramas para as três razões de aquecimento estudadas podem ser divididos, cada um, em três estágios de decomposição sob a influência da temperatura em relação à atmosfera ambiente (ar).

Os resultados da decomposição termogravimétrica do mesocarpo do coco verde são mostrados na Tab. (2). Verifica-se que a perda de água da matéria-prima, referente ao primeiro estágio (E_1) dos termogramas acontece em média a 403 K . A etapa subsequente de despolimerização da celulose e hemicelulose ocorre praticamente a uma temperatura média de 573 K . A etapa que marca o final da pirólise, também caracterizada pela decomposição da lignina, ocorre em média a 773 K . Deve-se entender que a verdadeira decomposição pirolítica só ocorre nas transições E_2 , quebra das ligações α -1,4 - glicosídicas da celulose, e E_3 , despolimerização térmica da lignina. Examinando-se a Tab. (2) fica evidente que para o mesocarpo do coco verde, a etapa de carbonização ou pirólise está completa a uma temperatura um pouco superior 773 K .

Segundo Mackay and Roberts (1982), a partir desta temperatura, o progressivo aquecimento resulta na formação do carvão via um rearranjo térmico interno, que por fim fornece camadas pseudografíticas com interstícios microporosos, que podem ser mais desenvolvidos na etapa de ativação com vapor d'água, levando desta forma a formação de mesoporos. Tendo em vista que a ativação do carvão só deve ser iniciada quando a pirólise estiver praticamente terminada, foi adotada em nossos experimentos a temperatura de 773 K para o início da ativação. A termogravimétrica também pode estimar a composição química média do mesocarpo do coco verde como constituída de 85% de água, 7% de celulose + hemicelulose, 7% de lignina e 2% de cinzas.

Tabela 2. Faixas de temperaturas da curva de análise termogravimétrica do mesocarpo do coco verde, nos três eventos de decomposição para as razões de 4,68 K/s, 4,72 K/s e 7,75 K/s.

Estágios	Razões de aquecimento		
	4,68 K/s	4,72 K/s	4,75 K/s
	Temperatura inicial e final para cada estágio (Θ_1 , Θ_2 e Θ_3) (Temperatura onde ocorreu a velocidade máxima do evento)		
Desidratação Θ_1	(299,4 - 402,26) K (358,56 K)	(299,42 - 405,27) K (360,46 K)	(300,00 - 419,40) K (367,64 K)
Hemicelulose e Celulose Θ_2	(402,26 - 628,67) K (563,89 K)	(405,27 - 636,25) K (561,07 K)	(419,40 - 640,05) K (578,93 K)
Lignina Θ_3	(628,67 - 827,49) K (687,15 K)	(639,25 - 795,35) K (733,78 K)	(367,05 - 850,06) K (766,17 K)

3.2. Estudo da influência das variáveis de processo por meio de planejamento fatorial

Os resultados obtidos usando o planejamento experimental da Tab. (1a) estão apresentados na Tab. (3). Os efeitos principais e de interação, bem como a estimativa do erro padrão de cada efeito (S_{efeito}) e curvatura foram calculados utilizando-se o programa Statistica v.5.1 (Statsoft, 1998), conforme mostra a Tab. (4).

Tabela 3. Resultados dos experimentos para as respostas estudadas: área superficial pelo método de BET (U_1), área de mesoporos (U_2), índice de iodo (U_3), azul de metileno (U_4), volume de mesoporos (U_5) e área de microporos (U_6).

Experimentos	U_1 ($10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$)	U_2 ($10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$)	U_3 (10^{-3} kg/kg)	U_4 (10^{-3} kg/kg)	U_5 ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$)	U_6 (10^3 kg/kg)
1	384,02	25,82	505	5,44	0,026	326,58
2	553,06	46,56	820	88,91	0,042	451,75
3	634,64	100,44	740	62,93	0,086	451,78
4	768,43	118,67	854	123,20	0,092	495,93
5	403,32	21,87	510	6,01	0,019	348,36
6	542,40	46,43	760	66,39	0,042	442,32
7	611,67	96,29	800	62,83	0,086	455,74
8	734,36	125,51	817	132,39	0,099	464,17
9	628,50	74,27	810	81,09	0,064	471,03
10	662,81	88,62	780	77,02	0,074	491,46
11	603,12	69,48	805	82,50	0,058	455,07

Tabela 4. Estimativa dos efeitos principais e de interação e seus desvios padrões para as respostas estudadas: área superficial, calculada pelo método de BET (U_1), área de mesoporos (U_2), índice de iodo (U_3), azul de metileno (U_4), volume de mesoporos (U_5) e área de microporos (U_6). Estão destacados, em negrito, os efeitos estatisticamente significativos, no nível de 95 % de confiança.

Efeito	Respostas					
	U_1 ($10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$)	U_2 ($10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$)	U_3 ($10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}$)	U_4 ($10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}$)	U_5 ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$)	U_6 ($10^3 \text{ kg}/\text{kg}$)
Média dos efeitos	579,0 ± 11	72,7 ± 3,5	725,7 ± 5,7	68,5 ± 1,0	0,062 ± 0,003	429,6 ± 6,5
Curvatura	105 ± 41	9,5 ± 13,5	146 ± 22	23,4 ± 3,8	0,008 ± 0,011	85 ± 24
Efeitos principais						
T - K	141 ± 22	23,2 ± 7,0	174 ± 11	68,4 ± 2,0	0,015 ± 0,006	68 ± 13
t - s	217 ± 22	75,1 ± 7,0	154 ± 11	53,6 ± 2,0	0,059 ± 0,006	75 ± 13
R - K/s	-12 ± 22	-0,3 ± 7,0	-12 ± 11	-3,2 ± 2,0	0,000 ± 0,006	-4 ± 13
Efeitos de Interação						
Tt	-13 ± 22	0,5 ± 7,0	-108 ± 11	-3,5 ± 2,0	-0,005 ± 0,006	-42 ± 13
TR	-10 ± 22	3,7 ± 7,0	-37 ± 11	-3,4 ± 2,0	0,004 ± 0,006	-17 ± 13
tR	-16 ± 22	1,7 ± 7,0	23 ± 11	7,8 ± 2,0	0,004 ± 0,006	-10 ± 13
TtR	5 ± 22	1,8 ± 7,0	12 ± 11	8,1 ± 2,0	0,000 ± 0,006	-1 ± 13
$t_{(2, 0,95)} \times S_{\text{efeito}}$	95	30,1	47	8,6	0,026	56

Para se avaliar a significância estatística dos efeitos calculou-se os intervalos com 95% de confiança para cada efeito. São considerados significativos os efeitos cujos valores absolutos são superiores aos valores apresentados na última linha da Tab. 4. Analisando-se os dados da Tab. 4, verifica-se que a razão de aquecimento não mostrou efeito significativo para as variáveis estudadas. Uma análise dos resultados obtidos para área superficial pelo método de BET (U_1), área de mesoporos (U_2), volume de mesoporos (U_5) e área de microporos (U_6), mostra que o tempo de ativação influenciou mais nestas respostas do que a temperatura. No caso de U_2 e U_5 , o efeito da temperatura não foi sequer considerado significativo na faixa estudada.

Também não foram considerados estatisticamente significativos os efeitos de interação de dois e três fatores, exceto no caso do número de iodo que apresentou efeito de interação antagonista entre as variáveis temperatura e tempo, e por isso seus resultados serão interpretados separadamente.

Assim, elevando-se o tempo de ativação de 300 para 1500 s há, em média, um acréscimo de 217 $10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ na área superficial, calculada pelo método de BET; 75,1 $\times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ na área de mesoporos; 0,054 $10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}$ para a adsorção do azul de metileno; 0,059 $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ no volume de mesoporos e 75 $\times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ na área de microporos. No caso da variável temperatura de ativação, aumentando-se de 1023 para 1123 K, há uma elevação média de 141 $\times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ na área superficial de BET; 0,058 $10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}$ para a adsorção do azul de metileno e 68 $\times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ na área de microporos.

Como há interação significativa entre as variáveis temperatura e tempo para a resposta referente ao número de iodo, é necessário interpretar conjuntamente os efeitos destes fatores utilizando o diagrama T x t, como mostra a Fig. (2). A elevação do tempo de ativação de 300 para 1500 s aumenta o número de iodo em 263 $10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}$ se a temperatura de ativação for mantida em 1023 K. Na temperatura de 1123 K, esse efeito é menos acentuado (cerca de 45 $10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}$). Por outro lado, o efeito da elevação da temperatura de 1023 para 1123 K é mais pronunciado quando o tempo de ativação é de 300 s (cerca de 283 $10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}$). Com um tempo de ativação de 1500 s, o aumento da temperatura provoca um incremento de apenas 65 $10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}$ na adsorção do iodo.

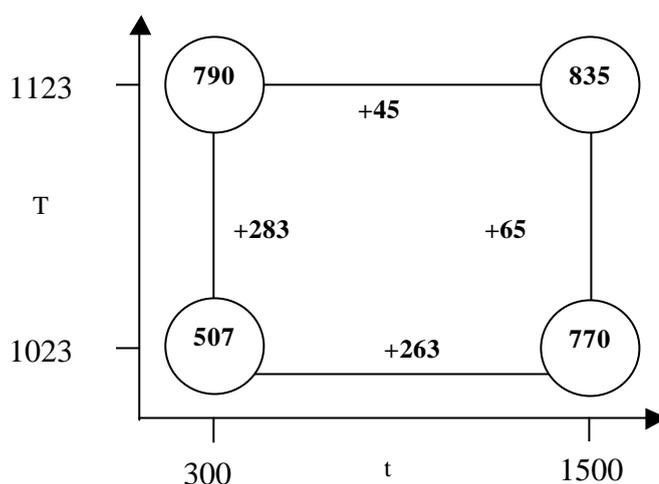


Figura 2. Diagrama T (temperatura) versus t (tempo) para interpretação dos resultados do planejamento fatorial 2^3 referente ao número de iodo. Os valores dos vértices do quadrado são as respostas médias do número de iodo (10^{-3} kg/kg).

A análise do teste de curvatura não indica significância para a área de BET, área de mesoporos e volume de mesoporos, o que nos leva a concluir que a superfície de resposta na faixa estudada dos fatores, é bem representada por um plano inclinado (U_1) e retas (U_2 e U_5). Desprezando-se os fatores que não apresentaram significância estatística, calculou-se os parâmetros do modelo para estas respostas, conforme mostram as Eq. (2), (3) e (4). Segundo Barros Neto et al (2001), para otimizar estas respostas deve-se ainda seguir o sentido de máxima inclinação indicado pelos modelos.

$$U_1 = 5,80 \times 10^5 (\pm 0,10 \times 10^5) + 7,0 \times 10^4 (\pm 1,0 \times 10^4) T + 1,10 \times 10^5 (\pm 0,10 \times 10^5) t \quad (2)$$

$$U_2 = 7,2 \times 10^4 (\pm 0,2 \times 10^4) + 3,7 \times 10^4 (\pm 0,4 \times 10^4) t \quad (3)$$

$$U_5 = 0,061 \times 10^{-3} (\pm 0,003 \times 10^{-3}) + 0,029 \times 10^{-3} (\pm 0,003 \times 10^{-3}) t \quad (4)$$

O mesmo teste de curvatura feito com o iodo, azul de metileno e área de microporos mostra curvatura significativa. Para ajustar um modelo quadrático representando adequadamente a superfície destas respostas, experimentos adicionais devem ser efetuados.

4. CONCLUSÃO

Os carvões ativados produzidos a partir do mesocarpo do coco verde apresentaram, para os níveis das variáveis estudados, a razão de aquecimento como sendo uma variável sem influência dentro do processo de produção de carvão ativado. O tempo de ativação influenciou significativamente todas as respostas estudadas e a temperatura final de ativação não apresentou efeito significativo para a área e volume de mesoporos. Os resultados para o carvão ativado produzido a 1123 K e 1500 s já mostram que esta matéria prima é promissora na produção de carvões mesoporosos e que podem ser aplicados em diversos processos industriais, particularmente na remoção de poluentes como as toxinas de cianobactérias em mananciais de abastecimento d'água e de corantes em efluentes têxteis. Novos experimentos estão sendo conduzidos a temperaturas e/ou tempos de ativação maiores, com o objetivo de maximizar a mesoporosidade dos carvões.

5. AGRADECIMENTOS

E.C. de Albuquerque Junior agradece pela bolsa de mestrado concedida pela CAPES.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Nasser A. El-Hendawy, Samra, S.E. and Girgis B.S., 2001, "Adsorption characteristics of activated carbons obtained from corncobs", *Colloids and Surfaces*, Vol. 180, pp. 209-221.
- Baçaoui, A., Yaacoubi, A., Dahbi, A., Bennouna, C., Ayele, J. and Mazet, M., 1998, "Activated carbons production from morocan olive wastes - influence of some factors", *Environmental Technology*, Vol. 19, pp.1203-1212.
- Baçaoui, A., Yaacoubi, A.; Dahbi, A., Bennouna, C., Phan Tan Luu, R., Maldonado-Hodar, F. J., Rivera-Utrilla, J. and Moreno-Castilla, C., 2001, "Optimization of conditions for the preparation of activated carbons olive-waste cakes", *Carbon*, Vol. 39, pp. 425-432.
- Banco de dados disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/>>. Acesso em 20 de dezembro de 2001.
- Barros Neto, B., Scarminio, I.S. and Bruns, R.E., 2001, "Como Fazer Experimentos. In: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria." Editora da UNICAMP, Campinas, SP.
- Boenhorff, J., 1980, "Active carbon adsorption", Vol. 1, Ann Arbor Science Publishers.
- Eiras, S.P. and Andrade, J.C., 1996, "O uso do simplex modificado como estratégia de otimização em química analítica", *Química Nova*, Vol. 19, No. 1, pp. 24-29.
- JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. JIS K 1474, 1992, "Test methods for activated carbon. Japanese Standards Association", Tokyo.
- Lussier, M. G.; Shull, J. C. and Miller, D. J., 1991, "Activated carbon from cherry stones", *Carbon*, Vol. 29, pp. 613-619.
- Mattson, J.S. and Mark, H.B.Jr, 1971, "Activated carbon surface chemistry and adsorption from solution", Marcel Deker, New York.
- McKay, D. M., Roberts, P. V., 1982, "The dependence of char and carbon yield on lignocellulosic precursor composition", *Carbon*, Vol. 20, pp. 87-94.
- Pelekani, C. and Snoeyink, V.L., 1999, "Competitive Adsorption in Natural Water: Role of Activated Carbon Pore Size", *Water Research*, Vol. 33, N° 5, pp. 1209-1219.
- Pollard, S.J.T., Fowler, G.D., Sollars, C.J. and Perry, R., 1992, "Low-Cost Adsorbents for Waste and Wastewater Treatment: A Review", *The Science of Total Environmental*, Vol. 116, pp. 31 - 52.
- StatSoft, 1998, "Statistica for Windows, versão 5.1", Inc. Tulsa, OK 74104 USA.
- Webb, P.A.; Orr Jr, C., 1999, "Analytical methods in fine particle technology", Micromeritics Instrument Corp., Norcross.
- Zhonghua Hu and Srinivasan, M. P., 1999, "Preparation of high-surface-area activated carbons from coconut shell", *Microporous and mesoporous Materials*, Vol. 27, pp. 11-18.
- Zhonghua Hu, Srinivasan, M. P., Yaming Ni, 2001, "Novel activation process for preparing highly microporous and mesoporous activated carbons", *Carbon*, Vol. 39, pp. 877-886.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ESTUDO QUALITATIVO DO CARVÃO ATIVADO DO MESOCARPO DO COCO VERDE, EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO, A PARTIR DE PLANEJAMENTOS FATORIAIS

Jaguaribe, E.F.

Laboratório de Carvão Ativado, Centro de Tecnologia, Campus I da UFPB, CEP 58059 900. João Pessoa – PB – Brasil. Fax: (0xx83)2167179.

Albuquerque Junior, E.C.

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Química, Laboratório de engenharia ambiental. Rua Professor avertano Rocha, 297, Bongi. Recife - PE. CEP: 50761-100. Fone: (0xx81) 32281214.

Pimentel, M.F.

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Química, Laboratório de engenharia ambiental. Rua Teresa Mélia s/n, Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-521. Fone: (0xx81) 32718711.

Molica, R.J.R.

Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco - ITEP. Av. Prof. Luís Freire 700, Cidade Universitária. Recife-PE. CEP: 50740-540. Fone: (0xx81) 32724264.

Abstract. *Activated carbons are adsorbents of considerable interest and application in the modern world. They are obtained quite exclusively from lignocellulosic materials. This work evaluates the influence of the production process variables of an activated carbon from unripe coconut mesocarp on parameters which determine its quality characteristics, using the Factorial Design Method. The raw material was carbonized and then physically activated in a rotary kiln using steam. The physical parameters considered were the BET superficial area, iodine number, methylene blue index, area and volume of mesopores. The heating rate (4,683 – 4,75 K/s), the activation time, (300 – 1500 s) and the final activation temperature (1023 – 1123 K), were considered in the factorial design method. It was deduced that the heating rate is not a significant parameter in the activation process, and also that the activated carbon quality depends mostly on the final activation temperature and on the activation holding time. The activation holding time is the only variable responsible for the increase of the mesopore area.*

Keywords. *Factorial Design, Activated Carbon, Production Process Variables, unripe coconut mesocarp, iodine number, methylene blue index*