ENDOCARPOS DE BABAÇU (*Orbignya* spp. Mart.) E DE
MACAÚBA (*Aerocoma sclerocarpa* Mart.) COMPARADOS À
MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex. Maiden PARA A
PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

JOSÉ DE CASTRO SILVA
Engenheiro Florestal

Orientador: LUIZ ERNESTO G. BARRICHELO

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz", da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Florestal.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Março - 1986

Para

minha mãe e avô Quita,
as mais tristes ausências;
meu filho, minha esposa e meu pai
as mais felizes presenças.

Para

os parentes, amigos e incentivadores,
os professores, orientadores e colaboradores,
a causa da ciência florestal no Brasil,

ofereço e dedico este trabalho.

Homenagens especiais aos amigos sempre presentes:

Prof. Dr. José Otávio Brito

Prof. Dr. Luiz Ernesto George Barrichelo

AGRADECIMENTOS

- . aos professores José Otávio Brito e Luiz Ernesto George Barrichelo, pela orientação, conhecimentos transmitidos e amizade;
- . aos professores José Gabriel de Lelles, Osvaldo Ferreira Valente, Mário Tomazello Filho e Antônio Natal Gonçalves, pelas sugestões;
- . aos colegas da Central de Ensino e Desenvolvimento Agrário de Florestal, em especial, ao Prof. José Elias Said de Resende, pela colaboração e amizade;
- . aos colegas do curso de pós-graduação, pela alegre convivência;
- . ao Dr. Antônio de Pádua Nacif, pela amizade e incentivo;
- . à bibliotecária Marialice Metzker Poggiani, pelo auxílio nas consultas;
- . aos professores e funcionários do Departamento de Silvicultura e do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, pela amizade, dedicação e colaboração;
- . à Universidade Federal de Viçosa e à Central de Ensino de Desenvolvimento Agrário de Florestal, pela oportunidade de treinamento;
- . à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo e, em especial, ao Departamento de Silvicultura, pela realização do curso;

.ív.

. à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Supe
rior - CAPES - pela concessão da bolsa e
. a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para que
este trabalho se concretizasse.

ÍNDICE

	<u>página</u>
RESUMO	vii
SUMMARY	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Espécies utilizadas: disponibilidade e usos	5
2.2. Características físico-químicas das matérias- -primas utilizadas	15
2.3. Comportamento das matérias-primas frente ao processo de carbonização	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Material	31
3.1.1. Madeira de eucalipto	31
3.1.2. Endocarpo de babaçu	32
3.1.3. Endocarpo de macaúba	32
3.2. Métodos	32
3.2.1. Preparação do material	32
3.2.2. Determinação da densidade básica	33
3.2.3. Análise química das matérias-primas ..	33
3.2.4. Produção de carvão vegetal com recupe- ração de voláteis	34
3.2.5. Rendimentos dos produtos das carboniza- ções	35
3.2.6. Análises do carvão	36

3.2.7. Rendimento em carbono fixo	39
3.3. Delimitação estatístico	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1. Caracterização das matérias-primas	41
4.2. Resultados das carbonizações das matérias-primas	42
4.2.1. Rendimento em peso do carvão	43
4.2.2. Rendimento gravimétrico de líquido condensado	49
4.2.3. Rendimento em peso de gases não-condensáveis	55
4.3. Análise imediata e rendimento em carbono fixo do carvão	59
4.3.1. Teor de matérias voláteis do carvão ..	60
4.3.2. Teor de cinzas do carvão	65
4.3.3. Teor de carbono fixo do carvão	70
4.3.4. Rendimento em carbono fixo do carvão ..	76
4.4. Densidade relativa e porosidade do carvão ...	81
4.4.1. Densidade relativa aparente do carvão.	82
4.4.2. Densidade relativa verdadeira do carvão	87
4.4.3. Porosidade do carvão	91
5. CONCLUSÕES	97
6. LITERATURA CITADA	99
APÊNDICE	109

ENDOCARPOS DE BABAÇU (*Orbignya* spp. Mart.) E DE
MACAÛBA (*Acrocòmia sclerocarpa* Mart.) COMPARADOS À
MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden
PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Autor: JOSÉ DE CASTRO SILVA

Orientador: Prof. Dr. LUIZ ERNESTO G. BARRICHELO

RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho, o estudo do comportamento do endocarpo de duas palmáceas (babaçu e macauba) em comparação com a madeira de eucalipto, na produção de carvão vegetal, em escala de laboratório. Procurou-se analisar a influência da temperatura e das espécies no processo de carbonização e caracterizar o carvão vegetal no que se refere aos rendimentos gravimétricos (carvão, líquido condensado e gás não-condensável), análise química imediata (teores de carbono fixo, voláteis e cinzas), rendimentos em carbono fixo, densidade relativa (aparente e verdadeira) e porosidade. As espécies foram caracterizadas através da determina-ção da densidade básica e da composição química.

Procedeu-se às carbonizações com temperaturas

.viii.

finais de 300, 500 e 700°C e utilizaram-se 500 g de amostras de material absolutamente seco para cada ensaio. Efetuaram-se quatro repetições por ensaio, carbonizando-se as amostras do material em forno de laboratório.

Com base nos resultados, pode-se concluir que:

a. os endocarpos de palmáceas apresentaram maiores rendimentos em carvão e menores rendimentos em gás não-condensável, quando comparados com a madeira de eucalipto. O rendimento em líquido condensado, por sua vez, apresentou os maiores valores para o endocarpo de babaçu, seguindo-se a madeira de eucalipto e, finalmente, o endocarpo de macaúba.

b. a madeira de eucalipto produziu carvões com valores superiores para a densidade verdadeira, porosidade e teores de carbono fixo. Por outro lado, apresentou carvão com valores inferiores para a densidade aparente, rendimento em carbono fixo e teores de cinzas. Quanto ao teor de voláteis nos carvões, os resultados se mostraram decrescentes na ordem: endocarpo de macaúba, madeira de eucalipto e endocarpo de babaçu.

c. a densidade aparente, teor de voláteis e rendimento gravimétrico de carvão das três espécies se mostraram inversamente correlacionados com a temperatura e, os demais parâmetros, diretamente correlacionados com a mesma.

.ix.

d. a temperatura que possibilitou a obtenção de carvão com melhores rendimentos e padrões de qualidade foi a de 500°C para todas as espécies ensaiadas.

e. o carvão de endocarpo das palmáceas necessitou de temperaturas mais elevadas para atingir os padrões de qualidade semelhantes aos obtidos para o carvão de madeira de eucalipto, em razão das diferenças das composições químicas.

f. o carvão de endocarpo das palmáceas pode ser considerado superior ao carvão de madeira de eucalipto para usos, tais como: gasogênios, operações metalúrgicas e siderúrgicas e uso doméstico.

BABAÇU (*Orbignya* spp. Mart.) AND MACAUBA (*Acrocomia
sclerocarpa* Mart.) ENDOCARPS COMPARED TO *Eucalyptus
grandis* W. Hill ex-Maiden WOOD FOR CHARCOAL PRODUCTION

Author: JOSÉ DE CASTRO SILVA

Adviser: LUIZ ERNESTO G. BARRICHELO

SUMMARY

The objective of this work was to study the behavior of the endocarp of two palm trees (babaçu and macauba) as compared to eucalypt wood (chips) for producing charcoal in a laboratory scale. An attempt was made to study the influence of temperature and of the raw materials on the carbonization process, and to characterize the resulting charcoal with regard to gravimetric yields (charcoal, condensed liquid and non-condensable gas), immediate chemical analysis (fixed carbon, volatile and ash contents), fixed carbon yields, relative density (apparent and real) and porosity.

After determining the basic and the chemical analysis of the raw materials, carbonization was effected. Under final temperatures of 300, 500 and 700°C, and

utilizing 500 g of completely dry material in each trial, in four replications, the material was carbonized in a horizontal laboratory kiln. The yields of the carbonization products, the immediate chemical analysis, relative density, and porosity of the charcoal produced were determined. The following conclusions may be drawn from the results obtained:

a. the palm tree endocarps showed higher charcoal yields and lower non-condensable gas yields, as compared to eucalyptus wood. The highest condensed liquid yields, in turn, were shown for babaçu endocarp, followed by eucalyptus wood and, lastly, macauba endocarp.

b. the charcoals produced from eucalyptus wood showed higher values for real density, porosity, and fixed carbon contents. On the other hand, they showed lower values for apparent density, fixed carbon yield and ash content. With regard to the content of volatile gases in the charcoals, decreasing results were found for macauba endocarp, eucalyptus wood, and babaçu endocarp, in that order.

c. the apparent density, volatile gas content, and gravimetric yield of charcoal from the three species were shown to be inversely correlated with temperature, while the remaining parameters were directly correlated with temperature.

d. the temperature which enabled obtaining charcoal with the highest yields and quality standards was 500°C for all the species under trial.

e. the charcoal from palm tree endocarp required higher temperatures to reach quality standards similar to those obtained for charcoal from eucalyptus wood due to differences in chemical compositions.

f. the charcoal from palm tree endocarp may be considered superior to charcoal from eucalyptus wood for use in gas plants, metallurgical and siderurgical operations and home use.

1. INTRODUÇÃO

Em 1940, o Brasil apresentou um balanço energético onde as fontes nacionais eram predominantes, com pequena participação de energéticos importados para suprir suas necessidades. Na época, vivendo de atividades agropastoris, mais de 90% da energia aqui gasta provinha da lenha.

O petróleo, fonte energética emergente no final do século XIX e início do século XX, passou a predominar frente às demais fontes de energia. No pós-guerra, seguindo a tendência da industrialização, o Brasil adotou o ritmo de crescimento de outros países mais desenvolvidos, utilizando intensivamente o petróleo. Em 1973, surgiu a crise do petróleo. A alta de preços provocou, além dos percalços para a sua aquisição, uma desarticulação econômica nas atividades que dele dependiam, resultando numa queda da produção. A economia, vítima de uma reação negativa em cadeia, iniciou um

processo recessivo. Para fazer frente à crise, o Brasil estabeleceu uma série de medidas: aumento da produção interna de petróleo, racionalização no seu uso e a busca incessante de fontes alternativas, como a biomassa, eletrotermia, carvão, energia solar, energia nuclear, etc..

A ênfase na utilização de energia proveniente de recursos vegetais, que comprovadamente substituiu aquela dos combustíveis tradicionalmente usados, gera vantagens econômicas sem evasão de divisas, cria empregos e um número expressivo de outras vantagens, a nível regional e nacional.

A magnitude dos recursos florestais brasileiros, consequência lógica da extensão territorial e da situação tropical dominante, é pouco aproveitada em função do potencial que representa. Acresce dizer que a atividade econômica florestal, que envolve a utilização de florestas tropicais e subtropicais, é essencialmente extrativista, impondo um padrão de vida extremamente primitivo. Com raras exceções, apenas nas florestas homogêneas implantadas se pratica uma moderna silvicultura e se adotam padrões técnicos que geram riquezas e bem-estar permanentes.

Existe, no Brasil, um grande número de variedades de palmeiras que, se devidamente exploradas, poderão desempenhar no futuro um papel destacado na economia nacional, pelo valor e diversidade de seus produtos. Com exceção dos estados da região Sul, todas as demais regiões do Brasil

.3.

possuem extensos palmares, constituindo-se num verdadeiro patrimônio, em estado potencial, à espera de uma exploração agrícola-industrial bem orientada. Ademais, a presença maior desses imensos recursos naturais coincide com regiões sem atividades econômicas expressivas, com terras marginais e com mão-de-obra primária. As imensas reservas naturais de palmáceas, no caso do dendê, do indaiá, do babaçu e da macaúba, revelam-se muito promissoras pelo alto rendimento energético por unidade de área cultivada e por se desenvolverem em áreas não competitivas com a agricultura de sobrevivência. O seu aproveitamento implicaria, ainda, na utilização de uma matéria-prima abundante e inesgotável, visto que os frutos são os únicos produtos economicamente mais representativos, o que poderia garantir a preservação da palmeira.

Embora os custos de produção e transformação sejam atualmente desfavoráveis em relação aos derivados do petróleo, os óleos vegetais extraídos de culturas perenes, pouco ou ainda não explorados no país, poderão representar uma possibilidade interessante na substituição parcial ou total das frações mais leves do petróleo. Dadas as grandes quantidades excedentes de biomassa residual na etapa de extração, o seu aproveitamento implicará na redução dos custos finais do óleo vegetal. A carbonização do endocarpo de algumas palmáceas poderá fornecer um carvão de excelente qualidade, quando comparado com o carvão mineral, notadamente no

que se refere ao seu baixo teor de cinzas, ausência de enxofre, elevada densidade e controlável teor de carbono fixo e de matérias voláteis. Além disso, alguns subprodutos de carbonização poderiam se constituir em prováveis matérias-primas essenciais para a indústria química e, em alguns casos, em fontes energéticas para o próprio processo, bem como para outros fins.

No atual estágio de desenvolvimento tecnológico, o carvão de babaçu tem participação assegurada nos diversos segmentos do mercado metalúrgico. As pesquisas até então realizadas revelaram que o carvão de babaçu já encontra suas principais aplicações em misturas a serem coqueificadas, no processo de sinterização, na produção de ferro-ligas e fundição. Os estudos sobre carbonização vem sendo desenvolvidos por várias empresas e institutos de pesquisas nacionais. Assim, a SIDERBRÁS, o IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, a CIT - Cia. Industrial Técnica, a AGRIMA, a TOBASA, já desenvolveram diferentes tipos de fornos.

Objetivou-se, com este trabalho, o estudo do comportamento do endocarpo de duas palmáceas [macaúba (*Acrocomia sclerocarpa* Mart.) e babaçu (*Orbignya* spp. Mart.)] em comparação com a madeira de eucalipto, na produção de carvão vegetal, em escala de laboratório. Procurou-se analisar a influência das temperaturas e das espécies no processo de carbonização, determinando-se os rendimentos dos produtos e caracterizando-se o carvão vegetal.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Espécies utilizadas: disponibilidade e usos

Em função da pouca quantidade de trabalhos já realizados sobre o aproveitamento das palmáceas, existe uma limitada disponibilidade de informações acerca do assunto. Com relação à madeira de eucalipto, existem inúmeros trabalhos que comprovam a sua versatilidade para os mais variados usos.

O eucalipto (*Eucalyptus* spp.) é uma planta da família das Mirtáceas, nativa da Austrália e de algumas ilhas do Pacífico. Foi introduzido oficialmente, no Brasil, no início do século e, desde logo, revelou-se como um gênero dos mais promissores. BALLONI *et alii* (1981) afirmam que a sua introdução se deveu a um problema puramente energético para compensar a escassez de lenha destinada às locomotivas. Somente com a criação dos incentivos fiscais, em 1966, é que o

reflorestamento, à base de eucaliptos, ganhou impulso. Tal foi a sua aceitação pelos silvicultores e empresários do setor que, em 1985, o Brasil já contava com mais de 6 milhões de hectares reflorestados, sendo mais de 60% com espécies do gênero *Eucalyptus*.

MACHADO (1981) afirma que, pela imperiosa necessidade nacional de matéria-prima, não se encontrou, entre as inúmeras espécies nativas e algumas exóticas, qualquer outra que concorresse com o eucalipto, pela perfeita adequação físico-química da madeira para os fins industriais, o rápido crescimento, a elevada produção de sementes, a resistência às pragas e doenças, a facilidade de tratamentos silviculturais e a grande plasticidade do gênero.

Através dos anos, o eucalipto vem desempenhando um papel importante no atendimento das necessidades de matéria-prima florestal, bem como poupando as últimas reservas florestais nativas, principalmente no centro-sul brasileiro. Segundo dados da ABRACAVE (1983), a madeira que tem servido de matéria-prima para a produção de carvão vegetal tem sido tradicionalmente obtida de florestas nativas, notadamente do cerrado. Ainda, nos dias de hoje, a participação da madeira, obtida de florestas nativas, na produção de carvão vegetal, é muito grande, conforme os dados apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Origem do material destinado à fabricação de carvão vegetal, no Brasil (m³).

Anos	Carvão de mata nativa	Carvão de reflorestamento	Total
1976	14.044.136	1.455.864	15.500.000
1977	13.648.140	1.601.860	15.250.000
1978	13.317.352	1.832.648	15.150.000
1979	15.116.033	2.183.967	17.300.000
1980	16.866.499	2.777.501	19.644.000
1981	15.576.651	3.653.782	19.230.433
1982	14.928.612	3.732.153	18.660.765
1983	18.422.967	4.086.928	22.509.895

Fonte: ABRACAVE (1983)

O suprimento energético industrial, à base de madeira, deve ser sustentado por um sistema que garanta um abastecimento contínuo e uniforme, a curto, médio e longo prazo, o que dificilmente poderá ser conseguido através das florestas naturais. MAGALHÃES (1980) afirma que, somente com o estabelecimento de florestas uniformes de rápido crescimen

to, ter-se-á a garantia de suprimento. As florestas à base das espécies de *Eucalyptus* atendem a todos esses requisitos e, a curto prazo, ocuparão uma posição de destaque no contexto nacional, tanto para finalidades energéticas como para o setor de celulose e papel e outros usos.

O babaçu (*Orbignya* spp) é uma planta da família das Palmáceas, nativa da região centro-norte brasileira, onde se localiza sua principal ocorrência. As áreas de ocorrência de babaçuais se estendem por nove estados brasileiros, sendo que quase dois terços se encontram no Maranhão, atingindo 30% da sua superfície, conforme a Tabela 2.

TABELA 2. Distribuição das áreas de ocorrência de babaçual nativo.

Estado	Área (10 ³ ha)
Maranhão	12.100
Piauí	1.200
Mato Grosso	1.500
Goiás	1.000
Minas Gerais	1.000
Outros	700
Brasil	17.500

Fonte: AGRIMA (1976).

Todas as partes da palmeira apresentam perspectivas de utilização. JUVILLAR (1980), WISNIEWSKI e MELO (1981) e VIDAL (1983) citam as opções de uso da palmeira. Assim:

- o **caule** pode ser usado na produção de celulose e aglomerado; as partes mais tenras podem ser usadas na alimentação (tal uso deve se restringir às palmeiras mais jovens e ao material de desbaste);
- as **folhas** podem ser usadas como forragem na alimentação de animais e para cobertura de casas e galpões; as fibras podem ser usadas na confecção de linhas e cordas;
- os **frutos** se constituem na parte economicamente mais representativa da palmeira. Possuem uma forma elipsoidal, um tanto cilíndricos, por vezes bojudos e, noutros, longos e finos. De peso (150 a 250 g) e tamanho (4,5 a 7,5 cm) variáveis, os cocos contêm sementes ou amêndoas, em número de 3 ou 4, podendo, mesmo alcançar até 7 ou 8 amêndoas por fruto. Cada parte do fruto poderá receber uma utilização especial. Assim:
 - . a **casca ou epicarpo** pode ser usada na produção de aglomerado e fibras; pode ser usada, ainda, na produção de furfural, álcool metílico e etílico, e como combustível primário nas caldeiras;
 - . o **mesocarpo** pode ser usado na produção de rações e na a-

limentação humana, pela riqueza em amido; pode ser, ainda, utilizado na produção de álcool etílico;

. o **endocarpo** pode ser usado na produção de furfural, álcool metílico e etílico, na fabricação de carvão e gases de pirogênese;

. a **amêndoa** pode ser usada na produção de óleo para alimentação, detergentes biodegradáveis e cosméticos; a torta resultante pode ser usada na fabricação de ração. As amêndoas contêm cerca de 66% de óleo, mas industrialmente se consegue obter um rendimento em torno de 57%, o que corresponde a 4% do peso do fruto. As outras partes do fruto são abandonadas no próprio local de coleta. VIDAL (1983) afirma que o babaçu sempre foi considerado uma das riquezas naturais do Brasil e há mais de meio século vem sendo explorado apenas para a obtenção de óleo. A Tabela 3 apresenta a produção de óleo de amêndoa de babaçu.

TABELA 3. Produção de óleo de amêndoa de babaçu no Brasil
(t).

Estados	1979	1980	1981
Pará	174	114	70
Maranhão	186.190	183.455	181.253
Piauí	19.445	20.214	18.543
Ceará	2.928	2.975	2.947
Pernambuco	3	3	3
Bahia	534	530	542
Minas Gerais	235	207	56
Goiás	41.404	43.451	38.394
Brasil	250.913	250.951	241.808

Fonte: IBGE (1983).

Considerando a produção de óleo de amêndoa citada na Tabela 3, estima-se que 5.803.392 t de outros componentes do fruto são desperdiçados à espera de uma utilização. Deste total, 3.506.216 t, correspondentes ao endocarpo (58% do fruto), poderiam ser convertidos em carvão.

A macaúba pertence à família das Palmáceas

do gênero *Acrocomia*, englobando cerca de vinte e cinco espécies (MARTINS, 1980). A sua distribuição se estende do México à Argentina, embora sua ocorrência seja mais abundante nas Antilhas, Costa Rica, Paraguai e Brasil. A presença da macaúba já foi constatada em quase todas as regiões do território brasileiro, embora a maior concentração da palmeira fosse localizada nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, notadamente nas áreas menos colonizadas. Não existem dados oficiais sobre as áreas de ocorrência e nem um levantamento sobre o potencial produtivo e disponibilidade de material, no Brasil. Os estudos realizados pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC, 1980) são os únicos realizados sobre a palmeira, revelando um potencial produtivo, apenas no estado de Minas Gerais, de 100 a 150 mil toneladas de frutos por ano.

O valor econômico representado pela macaúba pode ser avaliado em função das amplas possibilidades de seu aproveitamento. NOVAIS (1972) e MARTINS (1980) fazem menções das inúmeras opções de uso da palmeira. Assim:

- . o **caule** pode ser usado na confecção de ripas, caibros, moirões e calhas; o cerne pode ser usado na alimentação, de onde se extraem o palmito (no caso de palmeiras jovens) e uma fécula nutritiva;
- . as **folhas e pecíolos** podem ser usados na confecção de lixas, cordas, cestos, balaies e chapéus; podem ser usados,

ainda, como forragem na alimentação de animais;

. os **frutos** se constituem no produto economicamente mais representativo da palmeira. São uma drupa globosa, de forma esférica ou achatada, de peso (40 a 65 g) e tamanho (3,5 a 5,0 cm) variáveis, os coquilhos possuem uma casca (epicarpo) de coloração verde e amarelo, dura, mas quebra diça; a polpa (mesocarpo) de coloração amarelo ou esbranquiçado, de característica fibrosa ou mucilagínosa; o caroço (endocarpo) de coloração enegrecida, com a parece óssea fortemente aderida à polpa; a amêndoa, em número de 1 a 2 e, nos frutos maiores, até 3, de característica oleaginosa. ROCHA (1955), NOVAIS (1972), MARTINS (1983) apontam as inúmeras opções para o uso dos frutos de macaúba. Assim:

. a **casca** pode ser usada na fabricação de rações e como combustível primário nas caldeiras;

. a **polpa** pode ser usada na alimentação humana e animal, por ser adocicada, suavemente aromática e rica em glicídios; o óleo pode ser usado na fabricação de cosméticos, sabões, detergentes e velas. Outras utilizações potenciais do óleo de polpa de macaúba, principalmente quando o óleo apresenta elevada acidez, podem estar relacionadas com o seu uso na flotação para a separação de minérios, na trefilaria, na siderurgia e nos processos de lamininação a frio, sob a forma de emulsão em água;

- . o **endocarpo** pode ser usado como insumo energético, tanto no uso doméstico, como em escala industrial, na produção de carvão, com características semelhantes ao coque;
- . a **amêndoa** produz um óleo cuja riqueza em ácido láurico é uma garantia de seu valor econômico no disputado mercado dos óleos saturados. Há uma demanda mundial pelo óleo de amêndoa para a fabricação de cosméticos, sabonetes e margarinas. O farelo da amêndoa, pelos altos teores de proteína, pode ser usado no balanceamento de rações animais.

Atualmente, o aproveitamento dos frutos e de outros componentes da palmeira é insignificante, revelando um total desconhecimento das inúmeras opções de utilização. O seu aproveitamento mínimo é comprovado pelos dados apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. Produção de óleo de amêndoas de macaúba no Brasil (t).

Estados	1979	1980	1981
Maranhão	17	15	11
Ceará	87	93	73
Minas Gerais	89	87	160
Brasil	193	195	244

Fonte: IBGE (1983).

2.2. Características físico-químicas das matérias-primas utilizadas

Já foram identificadas mais de 600 espécies do gênero *Eucalyptus*, apresentando uma grande variação nos parâmetros físicos e químicos de suas madeiras, criando um sem-número de opções de utilização de seus produtos e subprodutos. MARTINS (1980), PENEDO (1980), LIMA *et alii* (1981), BRITO *et alii* (1982) afirmam que o interesse pela utilização de novas espécies de eucalipto para a produção de energia e carvão vegetal vem aumentando significativamente, em decorrência da necessidade da busca de melhores rendimentos de produção e melhores propriedades da madeira. Para comprovar a diversidade nos parâmetros químicos e físicos das madeiras do gênero *Eucalyptus*, a Tabela 5 apresenta os dados de algumas espécies.

As empresas que utilizam a madeira como fonte de energia, notadamente as empresas siderúrgicas à base de carvão vegetal, devem estar atentas a determinadas características da madeira tais como, composição química e densidade básica, que influenciarão na qualidade do carvão produzido. Segundo MAGALHÃES (1980), PENEDO (1980), BALLONI *et alii* (1981), tais características podem ser manipuladas através do melhoramento florestal, do manejo e da seleção criteriosa das espécies.

TABELA 5. Composição química e densidade básica das madeiras de eucalipto, com 10 anos de idade, em Salesópolis (SP).

Espécie	Teor (%)				Densidade básica média (g/cm ³)
	Holocelulose	Lignina	Cinzas	Extrativos em álcool-benzeno	
<i>E. pilularis</i>	79,7	25,2	0,20	2,6	0,462
<i>E. triantha</i>	80,6	29,4	0,16	2,1	0,565
<i>E. microcorys</i>	82,1	24,2	0,26	3,7	0,583
<i>E. gummifera</i>	80,6	24,2	0,37	1,9	0,466
<i>E. pellita</i>	82,2	25,2	0,43	1,1	0,553
<i>E. globulus</i>	82,4	21,8	0,48	1,7	0,474
<i>E. saligna</i>	80,6	24,6	0,30	2,1	0,476
<i>E. grandis</i>	83,0	23,3	0,29	1,7	0,391
<i>E. saligna</i>	82,0	25,9	0,28	1,8	0,469

Fonte: BRITO *et alii* (1982).

Devido à existência de várias espécies e às diferentes regiões de ocorrência, é comum encontrar-se uma certa variação na composição do coco babaçu (PEIXOTO, 1973; TENÓRIO, 1982; VIDAL, 1983). Uma composição média, em peso, apresenta os seguintes percentuais:

. epicarpo	12%
. mesocarpo	23%
. endocarpo	58%
. amêndoa	7%

TABELA 6. Composição química do endocarpo de babaçu.

Componente	Participação em peso (%) do endocarpo
Hemicelulose	22
Celulose	23
Lignina	39
Outros	16

Fonte: BRASIL (1977).

TENÓRIO (1982) afirma que o endocarpo é um tecido rico em feixes vasculares, fibras e parênquima de enchimento. É um tecido lignificado, extremamente duro, apresentando uma estrutura de grã fina e grande vocação para ser convertido em carvão. PEIXOTO (1972), OLIVEIRA (1977), JUVILLAR (1980), TENÓRIO (1982), OLIVEIRA *et alii* (1982e), VIDAL (1983), confirmam a potencialidade do endocarpo de babaçu para a produção de carvão de alta qualidade para uso em gasogênios e em operações siderúrgicas, em função de sua composição química e, principalmente, da alta densidade.

A composição média, em peso, do coco macaúba pode ser, assim, expressa porcentualmente:

. epicarpo	23,8%
. mesocarpo	38,1%
. endocarpo	31,0%
. amêndoa	7,1%

As inúmeras opções de utilização dos frutos, mencionadas anteriormente, podem ser confirmadas pela composição química dos seus principais componentes, conforme a Tabela 7.

TABELA 7. Análise química das diferentes partes constituintes do coco macaúba (%).

Contribuintes	Casca	Polpa	Endocarpo	Amêndoa
Cinzas	2,8	6,5	1,1	5,1
Extrativos	5,5	3,0	7,3	5,5
Proteína	2,5	8,5	2,0	50,1
Fibra	55,8	37,3	42,5	34,1
Lignina	29,5	7,9	34,0	10,2
Açúcares	-	18,7	-	-

Fonte: MARTINS (1983).

As tortas residuais da casca e da polpa, além de sua importância como fonte geradora de energia, poderão contribuir para a fertilização dos campos cultivados com macaúba ou com outra cultura qualquer, seja através das cinzas obtidas da carbonização dos resíduos nas caldeiras, seja diretamente pela aplicação da biomassa residual excedente. Por outro lado, os elevados teores de lignina do endocarpo lhe conferem características superiores para a produção de carvão. MARTINS (1983) afirma que, embora ainda não existam empresas que utilizem industrialmente o carvão do endocarpo de macaúba, as poucas tentativas realizadas experimentalmente, em Minas Gerais, comprovaram a viabilidade de sua utilização pela elevada densidade e composição do carvão.

2.3. Comportamento das matérias-primas frente ao processo de carbonização

2.3.1. Rendimento dos produtos da carbonização

A temperatura de carbonização é uma das variáveis mais importantes e controladoras do rendimento dos produtos obtidos da destilação da madeira (GOMES e OLIVEIRA, 1980; WENZL, 1970; OLIVEIRA *et alii*, 1982d). A sua influência nos rendimentos em carvão, líquido condensado e gás não-condensável é de fácil dedução: quanto maior a temperatura de carbonização, maior será o grau de destilação da madeira, com o conseqüente aumento na quantidade de líquido e gás; em contrapartida, ocorre uma redução no rendimento do carvão. Este efeito foi observado por Dupont (1931), citado por RAMALHO (1943), Pohl (1957), citado por WENZL (1970), HARRIS (1978), OLIVEIRA *et alii* (1980, 1982a, 1982c, 1982e), ALMEIDA (1983) e FARIA (1984). OLIVEIRA *et alii* (1982a), estudando o comportamento da madeira de *Eucalyptus grandis*, com idades de 6, 8 e 10 anos, a temperaturas de 300, 500 e 700°C, verificaram que a redução no rendimento gravimétrico do carvão é mais acentuada nas temperaturas mais baixas, havendo uma tendência de estabilização com a elevação das temperaturas de carbonização. Segundo os mesmos autores, o aumento da temperatura facilita a dissociação do carvão com a liberação de gases, podendo, até mesmo, gaseificar parte de sua estrutura sólida, acarretando um decréscimo no rendimen-

to. Este comportamento foi igualmente observado por ALMEIDA (1983), estudando o comportamento da madeira de *Eucalyptus grandis*, com 5 anos de idade, sob diversas temperaturas.

Inúmeras experiências têm mostrado que o comportamento térmico da matéria-prima reflete a soma das respostas térmicas de seus principais componentes: a hemicelulose é o componente menos estável e decompõe-se entre 225 e 325°C e é o principal responsável pela formação de ácido acético (BEALL, 1974); a celulose se degrada em temperaturas mais altas, entre 325 e 375°C e produz inúmeros compostos voláteis; a lignina é o componente mais estável e se decompõe, gradualmente, entre 250 e 500°C e contribui, predominantemente, para a formação do resíduo carbonífero (BEALL, 1974; PETROFF e DOAT, 1978; OLIVEIRA *et alii*, 1982a). A análise termogravimétrica da madeira e de seus componentes está apresentada na Figura 1, extraído de SHAFIZADEH *et alii* (1976).

FIGURA 1. Análise termogravimétrica da madeira e seus componentes.

Embora a lignina comece a se degradar sob o efeito de temperaturas mais baixas, a partir de 150°C , a sua degradação é mais lenta e difícil, fazendo com que a perda de peso final da lignina seja bem inferior que a observada para os outros componentes (GOLDSTEIN, 1978). BRITO e BARRICHELO (s/d), estudando a carbonização dos componentes individuais da madeira, verificaram que a lignina apresentou rendimentos mais elevados em carvão, em função da mesma ser um componente de estrutura complexa e muito

resistente à decomposição térmica. COLLET (1955) e PETROFF e DOAT (1978) encontraram uma correlação altamente significativa entre o rendimento gravimétrico do carvão e o teor de lignina de diversas madeiras tropicais. OLIVEIRA *et alii* (1982e) confirmaram a importância dos altos teores de lignina para o rendimento gravimétrico do carvão, quando compararam o comportamento de frutos de palmáceas e de madeira de eucalipto, frente à carbonização, conforme a Tabela 8.

TABELA 8. Resultados médios dos produtos da carbonização de frutos de palmáceas e de madeira de eucalipto, à temperatura de 450°C.

Material / Espécies	Umidade	Rendimento em relação ao material enfor- nado (base seca)			
		carvão	alcatrão	pirolenhoso	gases
Coco macaúba	9,3%	32,2	19,1	38,8	9,9
Endocarpo macaúba	9,2%	35,7	19,5	35,0	9,8
Endocarpo babaçu	11,5%	36,1	7,8	38,4	17,8
Madeira de eucalipto	15,0%	32,9	5,0	38,7	23,4

Fonte: OLIVEIRA *et alii* (1982).

O aumento da temperatura, em consequência da

redução do rendimento em carvão, provoca uma maior expulsão do material volatilizável, aumentando as frações líquida e gasosa. Este comportamento foi observado por WENZL (1970), OLIVEIRA *et alii* (1980, 1982a, 1982c, 1982e), ALMEIDA (1983) e FARIA (1984). Segundo GOLDSTEIN (1978), o líquido condensado é composto, principalmente, da água que estava ligada higroscopicamente ao material, bem como da degradação da hemicelulose, de uma parte da celulose e, até mesmo, de uma pequena fração da lignina. Na verdade, ocorre uma degradação de componentes de alto peso molecular resultando em produtos solúveis de baixo peso molecular (WENZL, 1970).

Muito embora seja possível a carbonização do fruto integral das palmáceas, MARTINS (1983) e OLIVEIRA *et alii* (1982e) consideram que é mais interessante fazê-lo apenas com o endocarpo, liberando as outras partes do fruto para outros usos. Segundo os mesmos autores, quando a amêndoa está aderida ao endocarpo é quase totalmente destilada, aumentando a fase líquida e diminuindo o rendimento em carvão.

2.3.2. Características químicas do carvão vegetal

A temperatura final de carbonização é um dos parâmetros mais importantes na composição química do carvão. A Tabela 9 apresenta o comportamento dos componentes químicos, bem como o rendimento em carvão, discutido anteriormen-

te, nos seus percentuais, em função da elevação da temperatura.

TABELA 9. Composição elementar e rendimento em carvão vegetal (%), em função da temperatura de carbonização.

Temperatura carbonização (°C)	Composição elementar			Rendimento %
	C	H	O	
200	52,3	6,3	41,4	91,8
300	73,2	4,9	21,9	51,4
400	82,7	3,8	13,5	37,8
500	89,6	3,1	6,7	31,0
600	92,6	2,6	5,2	29,1
800	95,8	1,0	3,3	26,7
1000	96,6	0,5	2,9	26,8

Fonte: WENZL (1970).

O aumento do teor de carbono fixo com a elevação da temperatura de carbonização é um comportamento bem conhecido e tem sido mencionado por vários autores, como SOUZA (1947), WENZL (1970), UHART (1976) e FARIA (1984), trabalhando com várias espécies florestais nativas, e por JUVILLAR (1980), OLIVEIRA *et alii* (1980, 1982a, 1982b, 1982e) e ALMEIDA (1983), trabalhando com *Eucalyptus grandis*. Segundo es-

tes autores, o aumento do teor de carbono ocorre devido à liberação de compostos condensáveis e gasosos durante a carbonização, formados principalmente por monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos. E para a formação desses compostos há um consumo muito maior de hidrogênio e, às vezes, de oxigênio do que de carbono. À medida em que se eliminam tais compostos, o teor de carbono no produto residual tenderá a aumentar progressivamente. Bergstrom (1954), citado por WENZL (1970), afirma que o teor de carbono fixo aumenta rapidamente com a elevação da temperatura e alcança um valor quase constante, próximo à temperatura de 700°C.

Estudando diversas madeiras tropicais, COLLET (1955) verificou que a quantidade de carbono fixo, fornecida por unidade de madeira enforada, era função da porcentagem de lignina da madeira. Semelhantes conclusões foram obtidas por BRITO e BARRICHELO (s/d) que verificaram que os maiores teores de carbono fixo encontrados nos carvões produzidos a partir de madeiras mais lignificadas eram decorrência do fato da lignina possuir cerca de 65% de carbono elementar em sua composição, contra 45% de carbono elementar encontrado, normalmente, nos polissacarídeos. PETROFF e DOAT (1978) também encontraram uma correlação bastante significativa entre o teor de carbono fixo do carvão e o teor de lignina das madeiras utilizadas.

As variações rendimento em carvão e teor de

carbono fixo ocorrem em sentidos opostos, isto é, para se obter um carvão com alto teor de carbono fixo há de se diminuir o rendimento gravimétrico do carvão. Segundo OLIVEIRA *et alii* (1982d), o rendimento em carbono fixo, como consequência destes comportamentos e, desde que seja mantida a mesma taxa de aquecimento, permanece constante. Os inúmeros trabalhos já realizados com *Eucalyptus grandis* confirmam que, independentemente da temperatura de carbonização, o rendimento em carbono fixo se situa por volta de 27% (GOMES e OLIVEIRA, 1980; PENEDO, 1980; OLIVEIRA *et alii*, 1982d).

A correlação direta observada entre a temperatura de carbonização e o teor de carbono fixo do carvão é uma das razões da correlação inversa entre a temperatura de carbonização e o teor de matérias voláteis do carvão. WENZL (1970), LAXAMANA (1980), OLIVEIRA *et alii* (1982d) e ALMEIDA (1983) afirmam que a elevação da temperatura provoca a expansão de gases, expulsando-os do interior do carvão, o que vem propiciar um produto final com menor teor de voláteis. Entre 600 e 700°C, quase toda a matéria volátil do carvão é extraída, restando uma pequena fração que permanece constante, segundo UHART (1976).

O efeito da temperatura final de carbonização sobre o teor de cinzas do carvão é motivo de muitas controvérsias e os dados encontrados na literatura são bastante divergentes. LAXAMANA (1980) afirma que o teor de cinzas do

carvão é função apenas da espécie e do sítio. HARRIS (1980) e ALMEIDA (1983), por sua vez, afirmam que a temperatura de carbonização não tem qualquer influência sobre o teor de cinzas do carvão. Estudando a composição química do carvão de *Mimosa hostilis*, FARIA (1984) verificou que o teor de cinzas aumentou com a temperatura de carbonização. O teor de cinzas do carvão, segundo WENZL (1980) e OLIVEIRA *et alii* (1982d) depende essencialmente da matéria-prima e da temperatura de carbonização. Segundo os últimos autores, as divergências encontradas na literatura poderiam ser creditadas às características peculiares de cada matéria-prima utilizada.

2.3.3. Características físicas do carvão vegetal

No carvão vegetal, a densidade é uma propriedade extremamente importante, pois ela determina, entre outras coisas, a utilização para uma determinada finalidade (GOMES e OLIVEIRA, 1980).

A densidade do carvão vegetal está intimamente ligada à densidade da matéria-prima que lhe deu origem. Estudando diversas madeiras tropicais, PETROFF e DOAT (1978) encontraram correlação altamente significativa entre a densidade da madeira e a densidade do carvão com elas produzido. Idênticas conclusões foram obtidas por BRITO e BARRICHELO (1978), JUVILLAR (1980), OLIVEIRA e ALMEIDA (1980) e OLIVEI-

RA *et alii* (1982d). Ao obterem tais conclusões, esses autores evidenciaram a importância da escolha da matéria-prima para a produção de carvão vegetal. MAGALHÃES (1980) afirma que é possível obter valores ótimos de densidade quando se utilizam programas de melhoramento e de manejo e se faz uma seleção criteriosa de espécies que apresentem as densidades mais convenientes.

Segundo MENDES *et alii* (1982), a densidade relativa corresponde ao peso de um dado volume de carvão dividido pelo peso de um igual volume de água. O mesmo autor verificou que a densidade e a porosidade do carvão são fortemente influenciadas pela densidade do material de origem, pela temperatura e velocidade de carbonização.

A densidade relativa aparente mede a densidade de uma "peça" individual de carvão, levando em consideração os poros internos. Segundo OLIVEIRA *et alii* (1982d), quanto maior a temperatura de carbonização, maior será o volume ocupado pelos vazios (poros) do carvão, em decorrência da expulsão dos gases, provocando uma diminuição da densidade aparente. Este comportamento, entretanto, somente deverá ocorrer se os "rearranjos" da peça ou contração do volume não variarem demasiadamente. BLANKENHORN *et alii* (1978) verificaram que a densidade relativa aparente apresentou tendências de atingir um valor mínimo por volta de 600°C. Resultados semelhantes foram obtidos por SLOCUM *et alii* (1978) e por OLI

VEIRA *et alii* (1982d).

A densidade relativa verdadeira é a medida da substância que compõe o carvão vegetal. Conforme já discutido anteriormente, o aumento da temperatura provoca uma maior concentração de carbono no carvão, tendendo à grafitização. Segundo OLIVEIRA *et alii* (1982d), ocorrem rearranjos atômicos nas cadeias de carbono com a elevação da temperatura, no sentido de diminuir a distância média entre os átomos de carbono. Assim, a densidade verdadeira aumenta sistematicamente com o aumento da temperatura, indicando um aumento da "concentração da matéria carbonosa" no carvão vegetal.

A porosidade indica a porcentagem de vazios no carvão vegetal. Segundo WENZL (1970) e OLIVEIRA *et alii* (1982d), a porosidade sempre cresce com o aumento da temperatura. Este comportamento pode ser facilmente compreendido quando se lembra que a expulsão do material volatilizável do carvão deixa vazios ou poros no interior do carvão. ASSUMPTÃO (1980) afirma que o carvão ativo exige, na sua fabricação, materiais leves e de grande porosidade, a fim de aumentar o poder de adsorção.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Madeira de eucalipto

Utilizaram-se 23 árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden, de um povoamento comercial, com 9 anos de idade, implantado no município de Lençóis Paulista - SP, com sementes originárias de Natal, África do Sul. Escolheu-se esta espécie por ser uma das mais utilizadas no Brasil na produção de carvão vegetal. Como o processo de transformação de madeira em carvão é por demais conhecido e como já é considerável o número de trabalhos com esta espécie, a madeira de eucalipto, neste trabalho, serviu como parâmetro para se comparar as outras matérias-primas como alternativas para a produção do carvão vegetal.

3.1.2. Endocarpo de babaçu

Foram coletados 100 kg de frutos de *Orbignya* spp. Mart., provenientes de várias palmeiras de povoamentos naturais, de idade desconhecida, do município de Imperatriz - MA.

3.1.3. Endocarpo de macaúba

Foram coletados 60 kg de frutos de *Acrocomia sclerocarpa* Mart., provenientes de várias palmeiras de povoamentos naturais, de idade desconhecida, do município de Florestal - MG.

3.2. Métodos

3.2.1. Preparação do material

a. **madeira de eucalipto** - após abatidas, retiraram-se discos de cada árvore com aproximadamente 2,5 cm de espessura a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial; após a sua identificação, todos os discos foram transformados em cunhas para a determinação da densidade básica. Esse material foi transformado em cavacos e misturado. Através de amostragem uma parte dos cavacos foi utilizada para a análise química e a restante para a carbonização.

b. **endocarpo de babaçu** - após a secagem, realizou-se a quebra manual de todos os frutos. Utilizando-se apenas o endocarpo, através de uma amostragem, procedeu-se à determinação da densidade básica, sendo o mesmo material utilizado para a análise química; o restante foi destinado à carbonização.

c. **endocarpo de macaúba** - todos os frutos foram coletados já semi-despolpados, como excedentes do processo de fabricação de sabão caseiro, mediante o uso de NaOH comercial e água quente. Retirado o remanescente fibroso, quebraram-se os endocarpos e eliminaram-se as amêndoas. Após uma criteriosa amostragem, procedeu-se à determinação da densidade básica, sendo o mesmo material utilizado para a análise química; o restante foi destinado à carbonização.

3.2.2. Determinação da densidade básica

Para a determinação da densidade básica, utilizou-se o método da balança hidrostática, segundo as normas da Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI T-258 os-76.

3.2.3. Análise química das matérias-primas

Após quarteamentos sucessivos, cada matéria-

-prima foi preparada de acordo com as normas da TAPPI T 11 m-59. As análises de laboratório consistiram na determinação dos seguintes componentes:

Componentes	Método de determinação
. Lignina (%)	TAPPI 222 os-74
. Extrativos totais (%)	TAPPI T-12 os-75
. Cinzas (%)	TAPPI T-15 m-58
. Holocelulose (%)	(por diferença)

3.2.4. Produção de carvão vegetal com recuperação de voláteis

Para cada ensaio, utilizaram-se 500 g de material absolutamente seco em estufa, à temperatura de $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Procedeu-se, então, às carbonizações de cada matéria-prima em forno horizontal de laboratório, com aquecimento elétrico. As temperaturas finais usadas foram 300, 500 e 700°C , partindo-se de uma temperatura inicial de 100°C , numa taxa média de aquecimento de 50°C , a cada 30 min. Colocou-se o material seco numa caixa metálica, com dimensões de 12,0 x 11,0 x 24,0 cm, com um tubo para a saída de gases. A fração volátil foi conduzida pelo tubo a um sistema de condensadores de água. Os produtos condensados (alcatrão + ácido pirolenhoso) ficaram armazenados num depósito da parte inferior do sistema de recuperação; os gases não-

-condensáveis foram eliminados. Ao final de cada carbonização, deixou-se o forno esfriar até 50°C e procedeu-se à pesagem do carvão e dos produtos condensados.

3.2.5. Rendimentos dos produtos das carbonizações

3.2.5.1. Carvão vegetal

O rendimento em peso do carvão expressa a relação entre o peso do carvão e o peso da matéria-prima, ambos na base seca. O cálculo foi feito para cada uma das repetições, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$RC = \frac{PC}{PMS} \times 100 \quad ; \quad \text{onde}$$

RC = rendimento em peso do carvão, na base seca (%)

PC = peso do carvão seco (g)

PMS = peso da matéria-prima seca (g)

3.2.5.2. Líquido condensado

O rendimento em peso do líquido condensado expressa a relação entre o peso do líquido condensado e o peso da matéria-prima, na base seca. Para cada repetição, calculou-se o rendimento, através da seguinte fórmula:

$$RL = \frac{PL}{PMS} \times 100 \quad ; \quad \text{onde}$$

RL = rendimento em peso do líquido condensado (%)

PL = peso do líquido condensado (g)

PMS = peso da matéria-prima seca (g)

3.2.5.3. Gases não-condensáveis

O rendimento em peso dos gases não-condensáveis foi obtido pela diferença dos rendimentos em peso do carvão e do líquido condensado, de um total de 100%. Para cada repetição, calculou-se o rendimento em peso dos gases não-condensáveis, através da seguinte fórmula:

$$RNC = 100 - (RC + RL) \quad ; \quad \text{onde}$$

RNC = rendimento em peso dos gases não-condensáveis (%)

RC = rendimento em peso do carvão (%)

RL = rendimento em peso do líquido condensado (%)

3.2.6. Análise do carvão

3.2.6.1. Análise imediata do carvão

Após quarteamentos sucessivos de cada material carbonizado, recolheram-se amostras de carvão, sendo es

tas moídas e peneiradas. Separou-se a fração que passou na peneira de 20 malhas (850 μ m) e foi retida na peneira de 100 malhas (150 μ m) "U.S. Tyler". A finalidade da análise química imediata do carvão vegetal é quantificar os teores de umidade na base úmida, matérias voláteis, cinzas e carbono fixo, na base seca. Para quantificar seus teores, cujos dados foram a média de 4 repetições, utilizou-se a norma NBR 8112 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

3.2.6.2. Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente envolve a medida do volume do carvão, levando em consideração os poros internos e o seu respectivo peso. Para o cálculo da densidade aparente, utilizou-se o aparelho preconizado por EIRA e SOUZA (1984), baseado na medição gravimétrica do volume de água deslocado por material vegetal em recipiente contendo água. O volume correspondente foi retirado do recipiente e coletado em cadinho previamente tarado, através de um sensor/controlador eletrônico de nível, acoplado a válvulas solenóides. O procedimento é semelhante ao usado por OLIVEIRA *et alii* (1982c). Para o cálculo da densidade relativa aparente, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$DA = \frac{PCS}{PAD + (PCM - PCS)} \quad ; \quad \text{onde}$$

DA = densidade relativa aparente (g/cm³)

PCS = peso do carvão seco (g)

PAD = peso do volume da água deslocada (g)

PCM = peso do carvão molhado (g)

3.2.6.3. Densidade relativa verdadeira

A densidade relativa verdadeira envolve a medida da densidade da substância que compõe o carvão vegetal, ou seja, é a densidade aparente, descontando-se o volume total de poros internos. Para a determinação da densidade relativa verdadeira utilizou-se o método picnométrico, citado por OLIVEIRA *et alii* (1982b e 1982d). A sua determinação foi feita através da seguinte fórmula:

$$DV = \frac{PC}{PC - (PA - PV)} \quad ; \quad \text{onde}$$

DV = densidade relativa verdadeira (g/cm³)

PC = peso do carvão seco (g)

PA = peso do picnômetro + água + carvão (g)

PV = peso do picnômetro + água (g)

3.2.6.4. Porosidade

A porosidade do carvão é obtida a partir dos

dados das densidades relativas aparente e verdadeira. Para tanto, estimou-se a porosidade do carvão, através da seguinte fórmula:

$$\text{Porosidade (\%)} = 100 - \left(\frac{\text{densidade aparente}}{\text{densidade verdadeira}} \right) \times 100$$

3.2.7. Rendimento em carbono fixo

O rendimento em carbono fixo foi calculado através do produto do teor de carbono fixo pelo rendimento em peso do carvão, através da seguinte fórmula:

$$\text{RCF (\%)} = \frac{\text{RC} \times \text{CF}}{100}, \quad \text{onde}$$

RCF = rendimento em carbono fixo (%)

RC = rendimento em carvão (%)

CF = teor de carbono fixo (%)

3.3. Delineamento estatístico

Para a análise dos resultados, utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, com tratamentos fatoriais, constando de 4 repetições para cada tratamento. Uti-

zaram-se 9 tratamentos discriminados quanto aos fatores: temperaturas finais de carbonização (300, 500 e 700°C) e matérias-primas (madeira de eucalipto, endocarpo de babaçu e endocarpo de macaúba). As variáveis de resposta consideradas na análise de variância, expressas na base seca, foram:

- . rendimento gravimétrico de carvão vegetal (%);
- . rendimento gravimétrico de líquido condensado (%);
- . rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis (%);
- . rendimento gravimétrico de carbono fixo (%);
- . teor de carbono fixo (%);
- . teor de matérias voláteis (%);
- . teor de cinzas (%);
- . densidade relativa aparente (g/cm³);
- . densidade relativa verdadeira (g/cm³) e
- . porosidade (%).

Os dados originalmente apresentados em porcentagem foram convertidos em $\text{arc sen } \sqrt{\%}/100$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização das matérias-primas

A Tabela 10 apresenta os resultados das análises químicas e da densidade básica das matérias-primas utilizadas.

As altas porcentagens de lignina e extrativos e os valores elevados de densidade para os endocarpos das palmáceas, principalmente da macaúba, foram os destaques da caracterização das matérias-primas. A madeira de eucalipto, por sua vez, apresentou elevados teores de holocelulose e os menores teores de lignina, extrativos e cinzas.

TABELA 10. Caracterização das matérias-primas.

Componentes	Madeira de eucalipto		Endocarpo de babaçu		Endocarpo de macaúba	
	$\bar{x}$	C.V.	$\bar{x}$	C.V.	$\bar{x}$	C.V.
Lignina (%)	24,60	0,01	27,90	0,01	36,60	0,01
Cinzas (%)	0,23	0,16	1,94	0,01	0,97	0,02
Extrativos (%)	6,40	0,01	7,80	2,51	10,80	0,03
Holocelulose (%)	69,00	0,01	64,30	0,01	52,60	0,01
Densidade Básica (g/cm ³)	0,457	6,90	1,085	6,00	1,161	4,10

$\bar{x}$ = média das três determinações

C.V. = coeficiente de variação (%)

4.2. Resultados das carbonizações das matérias-primas

Os resultados médios globais dos produtos das carbonizações estão indicados na Tabela 11. Logo a seguir, são apresentados e discutidos os resultados individualmente para cada parâmetro analisado, destacando-se as análises das correlações dos materiais com as temperaturas empregadas. Os resultados individuais dos produtos de cada carbonização estão indicados na Tabela 35 do Apêndice.

TABELA 11. Rendimentos gravimétricos médios de carvão, líquido condensado e gás não-condensável para os diferentes materiais e temperaturas.

Materias- primas	T(°C) de carboni- zação	Rendimento gravimétrico (%)					
		Carvão	C.V.	Líquido condensado	C.V.	Gás	C.V.
Madeira de eucalipto	300	36,94	2,63	41,66	1,08	21,40	5,48
	500	30,13	2,66	42,88	2,66	26,98	5,49
	700	28,85	2,18	44,88	1,28	26,27	2,43
Endocarpo de babaçu	300	38,13	2,22	41,53	2,04	20,34	5,36
	500	31,72	1,89	43,37	1,44	24,91	1,62
	700	30,63	1,18	45,78	2,08	23,51	3,10
Endocarpo de macaúba	300	44,34	1,16	33,24	3,44	22,42	4,83
	500	38,16	0,76	36,16	1,23	25,67	0,88
	700	35,62	1,41	39,64	1,67	24,74	1,95

C.V. = coeficiente de variação (%).

4.2.1. Rendimento gravimétrico de carvão

A Tabela 12 apresenta os dados médios do rendimento gravimétrico do carvão.

TABELA 12. Valores médios para o rendimento gravimétrico do carvão.

Materiais	Temperaturas de carbonização (°C)	Médias (%)
Madeira de eucalipto	300	36,94
	500	30,13
	700	28,85
Endocarpo de babaçu	300	38,13
	500	31,72
	700	30,63
Endocarpo de macaúba	300	44,34
	500	38,16
	700	35,62

A Figura 2 apresenta as curvas de rendimento gravimétrico de carvão, em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

Com o aumento da temperatura de carbonização, houve um aumento do grau de destilação da matéria-prima, provocando uma redução no rendimento gravimétrico de carvão. A redução no rendimento foi provocada pela perda de massa, em

Espécie	Equação	R ²
Eucalipto	$\text{LOG(RC)} = 3,3633 + 76,6706 (1/T)$	0,9441
Babaçu	$\text{LOG(RC)} = 3,4084 + 68,7377 (1/T)$	0,9520
Macaúba	$\text{LOG(RC)} = 3,5040 + 68,3605 (1/T)$	0,9902

FIGURA 2. Rendimento gravimétrico do carvão, na base seca, (RC), em relação à temperatura de carbonização (°C).

função da decomposição dos constituintes químicos das matérias-primas.

O efeito de redução no rendimento gravimétrico de carvão foi mais acentuado nas temperaturas mais baixas, em função da maior quantidade de transformações e reações químicas que, em geral, ocorrem nesta faixa de temperatura; à medida em que se eleva a temperatura, há uma tendência de estabilização no rendimento. A madeira de eucalipto foi a matéria-prima que apresentou a maior redução de rendimento na faixa de temperatura entre 300 e 500°C.

Os valores encontrados para o rendimento gravimétrico de carvão da madeira de eucalipto, principalmente para as temperaturas mais elevadas, foram ligeiramente superiores aos normalmente encontrados na literatura. OLIVEIRA *et alii* (1982d) e ALMEIDA (1983), trabalhando com *Eucalyptus grandis* em idades mais jovens, nas mesmas faixas de temperatura, encontraram valores inferiores de rendimento em carvão em relação aos encontrados no presente trabalho. A explicação para tal fato pode ser atribuída à diferença na idade do material utilizado.

O maior rendimento em carvão encontrado nas espécies com teores mais elevados de lignina, principalmente o endocarpo de macaúba, conforme os dados apresentados pela Tabela 10, se explica pelo fato deste componente fundamental

ser mais resistente à decomposição térmica, conforme a Figura 1.

Para todos os materiais, observou-se correlação altamente significativa entre o logaritmo do rendimento gravimétrico do carvão e o inverso das temperaturas estudadas.

A Tabela 13 apresenta a análise de variância para o rendimento gravimétrico do carvão na base seca.

Com base nos valores de F , apresentados na análise de variância, observou-se um efeito altamente significativo de tratamento sobre o rendimento gravimétrico em carvão. Observou-se que as temperaturas de carbonização exerceram maior influência sobre os rendimentos que as matérias-primas; por outro lado, não se observou significância para a interação entre as temperaturas e os materiais utilizados.

TABELA 13. Análise de variância para o rendimento gravimétrico de carvão na base seca.

Causa de variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	65,9277	427,29**
Temperatura (T)	2	79,0566	512,38**
Interação (M x T)	4	0,2271	1,47ns
Temperatura d. Material 1	2	27,5488	178,55**
Temperatura d. Material 2	2	23,8765	154,75**
Temperatura d. Material 3	2	28,0854	182,03**
Material d. Temperatura 1	2	21,5156	139,45**
Material d. Temperatura 2	2	26,3760	170,95**
Material d. Temperatura 3	2	18,4922	119,85**
Tratamento	8	36,3596	235,65**
Resíduo	27		
Total	35		

C.V. = 1,09%

Material: 1 = Endocarpo de macaúba 2 = Endocarpo de babaçu 3 = Madeira de eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C, 2 = 500°C, 3 = 700°C

.49.

O comportamento das médias dos tratamentos para o rendimento em peso de carvão, expresso em $\text{arc sen } \sqrt{\%}/100$, é apresentado a seguir. A identificação dos tratamentos foi feita através da letra inicial do nome de cada espécie, acompanhada da temperatura de carbonização correspondente. Tal procedimento foi utilizado, também, para os testes de Tukey dos demais parâmetros analisados no presente trabalho, sendo que os tratamentos estatísticos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, para o nível de 5% de probabilidade.

M.300	M.500	B.300	E.300	M.700	B.500	B.700	E.500	E.700
(41,75)	(38,15)	(38,13)	(37,43)	(36,64)	(34,27)	(33,61)	(33,29)	(32,49)

4.2.2. Rendimento gravimétrico de líquido condensado

A Tabela 14 apresenta os dados médios do rendimento gravimétrico de líquido condensado.

TABELA 14. Valores médios para o rendimento gravimétrico de líquido condensado.

Material	Temperaturas de carbonização (°C)	Médias (%)
Madeira de eucalipto	300	41,66
	500	42,88
	700	44,88
Endocarpo de babaçu	300	41,53
	500	43,37
	700	45,78
Endocarpo de macaúba	300	33,24
	500	36,16
	700	39,64

Com base nos valores apresentados na Tabela 14, verificou-se que quanto maior a temperatura de carbonização maior foi o grau de destilação da matéria-prima, aumentando a quantidade de líquido condensado (alcatrão + ácido pirolenhoso). Este efeito foi também observado por OLIVEIRA *et alii* (1982 a, 1983c, 1982d), ALMEIDA (1983) e FARIA (1984). O aumento da temperatura provocou uma liberação do material volatilizável que passa pelos condensadores, aumentando, assim, a fase líquida.

Os valores encontrados para o rendimento em peso do líquido condensado para o endocarpo de macaúba foram muito baixos, quando comparados com os valores obtidos para o endocarpo de babaçu e para a madeira de eucalipto, carbonizados nas mesmas condições. Tal comportamento pode ser explicado pela composição química apresentada pelo endocarpo de macaúba, revelando baixos teores em holocelulose, segundo a Tabela 10. Tal componente é o principal responsável pela produção de líquido condensado, conforme BEALL (1974) e GOLDSTEIN (1978).

A Figura 3 apresenta as curvas de rendimento gravimétrico de líquido condensado, em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

O efeito do aumento do rendimento em peso de líquido condensado apresenta um ligeiro acréscimo com as temperaturas mais elevadas, visto que a maior parte das matérias voláteis irá se condensar a partir de 500°C. No presente estudo, a temperatura que mais contribuiu para tal rendimento foi 700°C e a madeira de eucalipto e o endocarpo de babaçu, sem apresentarem diferença estatística entre si, foram os materiais que mais se destacaram.

Para os endocarpos de macaúba e babaçu, observou-se uma correlação altamente significativa entre o rendi-

Espécies	Equação	R ²
Eucalipto	$RLC = 38,7286 + 0,0047 T$	0,7761
Babaçu	$RLC = 38,2284 + 0,0061 T$	0,8535
Macaúba	$RLC = 32,2959 + 0,0095 T$	0,9309

FIGURA 3. Rendimento em peso de líquido condensado, na base seca (RLC), em relação à temperatura final de carbonização (°C).

mento gravimétrico de líquido condensado e as temperaturas estudadas; embora sem a mesma intensidade, para a madeira de eucalipto também se observou uma correlação positiva entre os fatores analisados.

A Tabela 15 apresenta a análise de variância para os rendimentos gravimétricos de líquido condensado, na base seca.

Com base nos valores de F, apresentados na análise de variância, observou-se um efeito altamente significativo de tratamento sobre o rendimento gravimétrico de líquido condensado. No presente estudo, as matérias-primas exerceram maior influência nos resultados que as temperaturas. A interação entre os fatores também apresentou significância estatística ao nível de 1% de probabilidade.

O comportamento das médias dos tratamentos para o rendimento em peso de líquido condensado, expresso em $\text{arc sen } \sqrt{\%} / 100$, é apresentado a seguir. Os tratamentos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, através do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

B.700	E.700	B.500	E.500	E.300	B.300	M.700	M.500	M.300
(42,58)	(42,06)	(41,19)	(40,91)	(40,20)	(40,12)	(39,02)	(36,97)	(35,21)

TABELA 15. Análise de variância para o rendimento gravimétrico de líquido condensado, na base seca.

Causa de variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	67,8203	306,17**
Temperatura (T)	2	22,1563	100,02**
Interação (M x T)	4	1,0084	4,55**
Temperatura d. Material 1	2	14,5781	65,81**
Temperatura d. Material 2	2	6,0586	27,35**
Temperatura d. Material 3	2	3,5410	15,99**
Material d. Temperatura 1	2	32,7461	147,83**
Material d. Temperatura 2	2	22,3086	100,71**
Material d. Temperatura 3	2	14,7842	66,74**
Tratamento	8	22,9984	103,82**
Resíduo	27		
Total	35		

C.V. = 1,18%

Material: 1 = Endocarpo de macaúba 2 = Endocarpo de babaçu 3 = Madeira de eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C; 2 = 500°C; 3 = 700°C

4.2.3. Rendimento em peso de gases não-condensáveis

A Tabela 16 apresenta os dados médios do rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis.

TABELA 16. Valores médios para o rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis, na base seca.

Material	Temperaturas de carbonização (°C)	Médias (%)
Madeira de eucalipto	300	21,40
	500	26,98
	700	26,27
Endocarpo de babaçu	300	20,34
	500	24,91
	700	23,51
Endocarpo de macaúba	300	22,42
	500	25,67
	700	24,74

Com base nos dados apresentados na Tabela 16, verificou-se um aumento no rendimento gravimétrico dos gases não-condensáveis quando se elevou a temperatura final de carbonização. O aumento da temperatura facilitou a dissociação

Espécies	Equação	R ²
Eucalipto	$\text{LOG(RNC)} = 3,5436 - 65,5999 (1/T)$	0,7352
Babaçu	$\text{LOG(RNC)} = 3,4618 - 48,9123 (1/T)$	0,6174
Macaúba	$\text{LOG(RNC)} = 3,4593 - 33,3877 (1/T)$	0,5672

FIGURA 4. Rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis, na base seca (RNC), em relação à temperatura de carbonização (°C).

do carvão, provocando a liberação de gases e até gaseificando parte do próprio carvão.

O gráfico da Figura 4 apresenta as curvas de rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

A madeira de eucalipto e o endocarpo de macaúba foram os materiais que apresentaram os maiores rendimentos, sendo que a temperatura de 500°C foi a que mais se destacou. Para todos os materiais estudados neste trabalho, observou-se baixa correlação entre o logaritmo do rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis e o inverso das temperaturas estudadas.

A Tabela 17 apresenta a análise de variância para o rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis.

Com base nos valores de F da análise de variância, verificou-se que houve um efeito altamente significativo de tratamento para o rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis. As temperaturas, no presente estudo, influenciaram mais nos resultados do que as matérias-primas. A interação entre os fatores, entretanto, não apresentou significância ao nível de 1% de probabilidade.

TABELA 17. Análise de variância para o rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis, na base seca.

Causa de Variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	5,4531	14,62**
Temperatura (T)	2	30,1836	80,90**
Interação (M x T)	4	0,9438	2,53ns
Temperatura d. Material 1	2	5,0742	13,60**
Temperatura d. Material 2	2	10,3730	27,80**
Temperatura d. Material 3	2	16,6235	44,56**
Material d. Temperatura 1	2	2,1157	5,67**
Material d. Temperatura 2	2	1,8667	5,00**
Material d. Temperatura 3	2	3,3589	9,00**
Tratamento	8	9,3811	25,14**
Resíduo	27	0,3731	
Total	35		

C.V. = 2,08%

Material: 1 = Endocarpo
de
macaúba

2 = Endocarpo
de
babaçu

3 = Madeira de
eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C;

2 = 500°C;

3 = 700°C

.59.

O comportamento das médias dos tratamentos para o rendimento gravimétrico de gases não-condensáveis, expresso em $\text{arc sen } \sqrt{\%} / 100$ é apresentado a seguir. Os tratamentos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, através do teste de Tukey, para o nível de 5% de probabilidade.

E.500	E.700	M.500	B.500	M.700	B.700	M.300	E.300	B.300
(31,29)	(30,83)	(30,44)	(29,94)	(29,83)	(29,00)	(28,26)	(27,55)	(26,80)

4.3. Análise imediata e rendimento em carbono fixo do carvão

Além de alterar os rendimentos dos produtos, a temperatura provoca mudanças substanciais na composição do carvão. Seu efeito pode ser observado pelos resultados médios da composição química e do rendimento em carbono fixo do carvão dos diversos materiais, apresentados na Tabela 18.

TABELA 18. Resultados médios da análise imediata e do rendimento em carbono fixo do carvão de diversos materiais.

Matérias-primas	T °C de carbonização	Análise química imediata (%)						Rendto. em carbono fixo	C.V.
		Voláteis	C.V.	Cinzas	C.V.	Carb. fixo	C.V.		
Madeira de eucalipto	300	30,17	0,18	0,58	20,45	69,24	0,43	25,58	2,68
	500	9,41	10,41	1,02	37,32	89,07	1,62	26,85	4,11
	700	4,75	7,73	1,11	10,87	94,20	0,34	27,18	1,99
Endocarpo de babaçu	300	34,59	0,83	4,37	3,09	61,04	0,31	23,28	1,91
	500	9,22	1,40	6,03	3,08	84,75	0,20	26,88	1,80
	700	3,63	3,45	6,64	2,09	89,72	0,16	27,49	1,02
Endocarpo de macaúba	300	38,03	1,24	1,48	11,53	60,48	0,64	26,81	1,08
	500	10,77	6,95	2,40	13,61	86,83	0,69	33,13	1,08
	700	6,16	5,17	3,31	5,62	90,52	0,23	32,24	1,64

C.V. = coeficiente de variação (%)

Os resultados de todas as repetições encontram-se na Tabela 35 do Apêndice. A seguir, são apresentados e discutidos os resultados de cada parâmetro.

4.3.1. Teor de matérias voláteis do carvão

A Tabela 19 apresenta os dados médios do teor de matérias voláteis do carvão.

TABELA 19. Valores médios para os teores de matérias voláteis do carvão.

Materiais	Temperaturas de carbonização (%)	Médias (°C)
Madeira de eucalipto	300	30,17
	500	9,14
	700	4,75
Endocarpo de babaçu	300	34,59
	500	9,22
	700	3,63
Endocarpo de macaúba	300	38,03
	500	10,77
	700	6,16

A Figura 5 apresenta as curvas dos teores de matérias voláteis do carvão dos diversos materiais em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

O aumento da temperatura foi acompanhado sistematicamente de uma diminuição do teor de matérias voláteis do carvão. A elevação da temperatura provocou a expansão dos gases e, em consequência, a sua expulsão do interior do car-

FIGURA 5. Teor de matérias voláteis no carvão, na base seca (TV), em relação à temperatura de carbonização (°C).

vão, propiciando um produto final com menor teor de voláteis. A liberação das matérias voláteis do carvão ocorreu, em maior quantidade, quando se elevou a temperatura de 300 para 500°C, como consequência das inúmeras reações que ocorrem nesta faixa de temperatura.

O carvão do endocarpo de macaúba foi o material que apresentou a maior quantidade de matérias voláteis, mostrando uma maior dificuldade na liberação de gases do seu interior durante o aquecimento. Observou-se, por outro lado, que não houve diferença significativa entre os teores de matérias voláteis dos carvões produzidos a partir do endocarpo de babaçu e da madeira de eucalipto.

Para todos os materiais estudados, observou-se altíssima correlação entre o teor de matérias voláteis do carvão e o inverso das temperaturas estudadas.

A Tabela 20 apresenta os dados da análise de variância para os teores de matérias voláteis do carvão, na base seca.

Com base nos valores de F, apresentados na análise de variância, observou-se um efeito altamente significativo de tratamento sobre o teor de matérias voláteis do carvão. No presente estudo, as temperaturas exerceram maior influência nos resultados que as matérias-primas. A intera-

TABELA 20. Análise de variância para os teores de matérias voláteis do carvão, em base seca.

Causa de variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	24,4492	110,55**
Temperatura (T)	2	1754,2383	7932,17**
Interação (M x T)	4	6,1662	27,88**

Temperatura d. Material 1	2	628,9482	2843,93**
Temperatura d. Material 2	2	672,5830	3041,23**
Temperatura d. Material 3	2	465,0403	2102,78**

Material d. Temperatura 1	2	22,7285	102,77**
Material d. Temperatura 2	2	2,5995	11,75**
Material d. Temperatura 3	2	11,4543	51,79**

Tratamento	8	447,7550	2024,62**
Resíduo	27	0,2212	

Total	35		

C.V. = 2,12%

Material: 1 = Endocarpo de macaúba 2 = Endocarpo de babaçu 3 = Madeira de eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C; 2 = 500°C; 3 = 700°C

ção entre os fatores também apresentou significância estatística ao nível de 1% de probabilidade.

O comportamento das médias dos tratamentos para o teor de matérias voláteis do carvão, expresso em $\arcsen \sqrt{\%}/100$, é apresentado a seguir. Os tratamentos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, através do teste de Tukey, para o nível de 5% de probabilidade.

M.300	B.300	E.300	M.500	E.500	B.500	M.700	E.700	B.700
(38,07)	(36,02)	(33,32)	(19,15)	(17,84)	(17,67)	(14,36)	(12,58)	(10,98)

4.3.2. Teor de cinzas do carvão

A Tabela 21 apresenta os dados médios do teor de cinzas do carvão, na base seca.

TABELA 21. Valores médios para os teores de cinzas do carvão, na base seca.

Materiais	Temperaturas de carbonização (°C)	Médias (%)
Madeira de eucalipto	300	0,58
	500	1,02
	700	1,11
Endocarpo de babaçu	300	4,37
	500	6,03
	700	6,64
Endocarpo de macaúba	300	1,48
	500	2,40
	700	3,31

A Figura 6 apresenta as curvas dos teores de cinzas do carvão, em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

O aumento de temperatura foi acompanhado de um aumento no teor de cinzas do carvão. A maior variação no teor de cinzas ocorreu no intervalo entre 300 e 500°C.

FIGURA 6. Teor de cinzas do carvão, na base seca (TC), em função da temperatura final de carbonização (°C).

O teor de cinzas encontrado no carvão foi proporcional à quantidade de cinzas originalmente presente na matéria-prima conforme a Tabela 10. O endocarpo de babaçu apresentou originalmente um maior teor de cinzas, quando comparado com as outras matérias-primas; tal diferença se manteve no material carbonizado e a temperatura que mais contribuiu para este teor de cinzas foi 700°C .

Para os endocarpos de macaúba e babaçu, observou-se altíssima correlação entre o logaritmo do teor de cinzas do carvão e o logaritmo das temperaturas estudadas; para a madeira de eucalipto, entretanto, observou-se baixa correlação.

A Tabela 22 apresenta a análise de variância para o teor de cinzas do carvão, na base seca.

Com base nos valores de F da análise de variância, verificou-se que houve um efeito altamente significativo de tratamento para o teor de cinzas do carvão. No presente estudo, as matérias-primas influenciaram mais nos resultados que as temperaturas. A interação entre os fatores mostrou-se significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade.

TABELA 22. Análise de variância para o teor de cinzas do carvão, na base seca.

Causa de variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	212,6161	886,16**
Temperatura (T)	2	22,5746	94,09**
Interação (M x T)	4	0,9519	3,97*

Temperatura d. Material 1	2	12,3145	51,33**
Temperatura d. Material 2	2	8,8955	37,08**
Temperatura d. Material 3	2	3,2686	13,52**

Material d. Temperatura 1	2	61,7434	257,34**
Material d. Temperatura 2	2	73,5508	306,55**
Material d. Temperatura 3	2	79,2259	330,20**

Tratamento	8	59,2736	247,04**
Resíduo	27	0,2399	

Total	35		

C.V. = 5,27%

Material: 1 = Endocarpo de macaúba 2 = Endocarpo de babaçu 3 = Madeira de eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C; 2 = 500°C; 3 = 700°C

O comportamento das médias dos tratamentos para o teor de cinzas do carvão, expresso em $\text{arc sen } \sqrt{\%}/100$, é apresentado a seguir. Os tratamentos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, através do teste de Tukey, para o nível de 5% de probabilidade.

B.700	B.500	B.300	M.700	M.500	M.300	E.700	E.500	E.300
(14,93)	(14,22)	(12,07)	(10,48)	(8,89)	(6,98)	(6,03)	(5,73)	(4,34)

4.3.3. Teor de carbono fixo do carvão

A Tabela 23 apresenta os dados médios do teor de carbono fixo do carvão, na base seca.

O aumento da temperatura de carbonização provoca uma diminuição do rendimento em peso de carvão e, como consequência, ocorrem alterações em suas qualidades físicas e químicas. O parâmetro indicativo de qualidade mais imediato é o teor de carbono fixo e que está positivamente correlacionado com a temperatura. Este comportamento foi observado por vários autores, como SOUZA (1947), WENZL (1970), UHART (1978), JUVILLAR (1980), OLIVEIRA *et alii* (1982d), ALMEIDA (1983) e FARIA (1984).

TABELA 23. Valores médios para os teores de carbono fixo do carvão, na base seca.

Materiais	Temperaturas de carbonização (°C)	Médias (%)
Madeira de eucalipto	300	69,24
	500	89,07
	700	94,20
Endocarpo de babaçu	300	61,04
	500	84,75
	700	89,72
Endocarpo de macaúba	300	60,48
	500	86,83
	700	90,52

A Figura 7 apresenta as curvas dos teores de carbono fixo do carvão em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

Para se obter um carvão com altos teores de carbono fixo, há necessidade de se introduzir quantidades crescentes de energia no processo. Verificou-se que o teor

Espécies	Equação	R ²
Eucalipto	$TC = 91,5384 - 10508,2/T$	0,9933
Babaçu	$TC = 87,3128 - 10684,9/T$	0,9916
Macaúba	$TC = 89,7035 - 11428,1/T$	0,9772

FIGURA 7. Teor de carbono fixo do carvão, base seca (TC), em relação à temperatura de carbonização (°C).

de carbono fixo aumentou rapidamente com a elevação da temperatura de carbonização e alcançou um valor quase constante, próximo à temperatura de 700°C . Assim, quando se trabalhou na faixa de temperatura entre 300 e 500°C , o ganho obtido com o aumento do teor de carbono fixo foi relativamente grande; entretanto, quando se trabalhou com temperaturas elevadas, o ganho observado com o teor de carbono fixo não foi relevante.

O endocarpo de babaçu e, principalmente, o endocarpo de macaúba, apresentaram baixos teores de carbono fixo do carvão, quando comparados com a madeira de eucalipto, a 300°C . No intervalo de temperatura entre 300 e 500°C , entretanto, os carvões de endocarpo de macaúba e de babaçu apresentaram acréscimos importantes no teor de carbono fixo, cujos valores se aproximaram aos obtidos para o carvão de madeira de eucalipto. A explicação para tal fato é que as matérias-primas que apresentam altos teores de lignina são mais resistentes à decomposição térmica, necessitando de temperaturas mais elevadas para se transformar em carvão e concentrar o carbono em suas estruturas.

O material que apresentou o maior teor de carbono fixo dentro das temperaturas estudadas foi o carvão da madeira de eucalipto, justamente pela facilidade de eliminar a holocelulose e extrativos, concentrando o carbono na sua estrutura.

Para todos os materiais, observou-se altíssima correlação entre o teor de carbono fixo do carvão e o inverso das temperaturas estudadas.

A Tabela 24 apresenta a análise de variância para teor de carbono fixo do carvão, na base seca.

Os valores de F obtidos da análise de variância indicam que os tratamentos, bem como as interações entre os fatores material e temperatura, apresentaram significância estatística ao nível de 1% de probabilidade. Observou-se, ainda, que a temperatura teve muito mais influência que os materiais nos resultados, no presente estudo.

O comportamento das médias dos tratamentos para o teor de carbono fixo do carvão, expresso em $\arcsen \sqrt{\%} / 100$, é apresentado a seguir. Os tratamentos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, através do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

E.700	M.700	B.700	E.500	M.500	B.500	E.300	B.300	M.300
(76,07)	(72,06)	(71,30)	(71,17)	(68,72)	(67,01)	(56,32)	(51,38)	(51,05)

TABELA 24. Análise de variância para o teor de carbono fixo do carvão, na base seca.

Causa de variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	74,3750	473,62**
Temperatura (T)	2	1369,2578	8719,35**
Interação (M x T)	4	2,0989	13,37**

Temperatura d. Material 1	2	510,2500	3249,24**
Temperatura d. Material 2	2	439,9023	2801,27**
Temperatura d. Material 3	2	423,3145	2695,64**

Material d. Temperatura 1	2	34,8574	221,97**
Material d. Temperatura 2	2	17,4902	111,38**
Material d. Temperatura 3	2	26,2402	167,10**

Tratamento	8	361,9576	2304,92**
Resíduo	27	0,1570	

Total	35		

C.V. = 0,61%

Material: 1 = Endocarpo
de
macaúba

2 = Endocarpo
de
babaçu

3 = Madeira de
eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C

2 = 500°C

3 = 700°C

4.3.4. Rendimento em carbono fixo do carvão

A Tabela 25 apresenta os dados médios do rendimento em carbono fixo do carvão.

TABELA 25. Valores médios para o rendimento em carbono fixo do carvão, na base seca.

Materiais	Temperaturas de carbonização (°C)	Médias (%)
Madeira do eucalipto	300	25,88
	500	26,85
	700	27,18
Endocarpo de babaçu	300	23,28
	500	26,88
	700	27,49
Endocarpo de macaúba	300	26,81
	500	33,13
	700	32,24

A Figura 8 apresenta as curvas do rendimento em carbono fixo em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

FIGURA 8. Rendimento em carbono fixo, base seca (RF), em relação à temperatura de carbonização (°C).

O rendimento em carbono fixo do carvão apresentou uma variação com maior intensidade no intervalo de temperatura entre 300 e 500°C, como consequência das maiores variações no rendimento gravimétrico e no teor de carbono fixo do carvão; no intervalo de temperatura entre 500 e 700°C, o rendimento em carbono fixo se manteve praticamente constante, especificamente no caso do carvão de madeira de eucalipto e de endocarpo de babaçu, cujos rendimentos se situaram próximos de 27%. Esta constância no rendimento em carbono fixo é explicada pelas variações proporcionais que ocorreram em sentidos opostos no rendimento gravimétrico e no teor de carbono fixo do carvão. O carvão de endocarpo de macaúba, em função do alto rendimento gravimétrico, foi o material que apresentou o maior rendimento em carbono fixo.

Os valores encontrados para o rendimento em carbono fixo do carvão da madeira de eucalipto, principalmente nas temperaturas mais elevadas, foram ligeiramente superiores aos normalmente encontrados na literatura; tal comportamento pode ser explicado pelo alto rendimento gravimétrico do carvão, em função das características peculiares da matéria-prima utilizada, conforme já mencionado anteriormente.

Para os endocarpos de macaúba e de babaçu, observou-se uma correlação altamente significativa entre o logaritmo do rendimento em carbono fixo do carvão e o inverso das temperaturas estudadas; para a madeira de eucalipto, observou-se baixa correlação.

A Tabela 26 apresenta a análise de variância para o rendimento em carbono fixo do carvão na base seca.

Baseado nos valores de F, obtidos na análise de variância, observou-se um forte efeito de tratamento. A interação entre os fatores espécie e temperatura apresentou significância estatística ao nível de 1% de probabilidade. No presente estudo, as espécies influenciaram mais nos resultados que as temperaturas.

O comportamento das médias dos tratamentos para o rendimento em carbono fixo do carvão, expresso em $\arcsen \sqrt{\%}/100$, é apresentado a seguir. Os tratamentos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, através do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

M.500	M.700	B.700	E.700	E.500	B.500	M.300	E.300	B.300
(35.14)	(34.60)	(31.62)	(31.42)	(31.30)	(31.23)	(31.19)	(30.38)	(28.84)

TABELA 26. Análise de variância para o rendimento em carbono fixo do carvão, na base seca.

Causa de variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	32,9922	268,60**
Temperatura (T)	2	23,3125	189,79**
Interação (M x T)	4	2,6998	21,98**

Temperatura d. Material 1	2	18,3965	149,77**
Temperatura d. Material 2	2	9,0127	73,37**
Temperatura d. Material 3	2	1,3047	10,62**

Material d. Temperatura 1	2	5,6563	46,05**
Material d. Temperatura 2	2	20,0557	163,28**
Material d. Temperatura 3	2	12,6802	103,23**

Tratamento	8	15,4261	125,59**
Resíduo	27		
Total	35		

C.V. = 1,10%

Material: 1 = Endocarpo de macaúba 2 = Endocarpo de babaçu 3 = Madeira de eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C 2 = 500°C 3 = 700°C

4.4. Densidade relativa e porosidade do carvão

Os resultados médios de densidade relativa e porosidade do carvão estão indicados na Tabela 27.

Os resultados de todas as repetições encontram-se na Tabela 36 do Apêndice.

TABELA 27. Resultados médios de densidade relativa aparente, densidade relativa verdadeira e porosidade do carvão.

Materias- primas	T°C de carbo- nização	Densidade relativa (g/cm ³)				Poro- sidade (%)	C.V.
		Aparente	C.V.	Verda- deira	C.V.		
Madeira de eucalipto	300	0,300	0,57	1,43	0,57	79,00	0,28
	500	0,296	0,69	1,46	0,79	79,74	0,14
	700	0,289	0,60	1,72	0,56	83,14	0,23

Endocarpo de babaçu	300	0,998	0,15	1,38	0,59	28,49	1,31
	500	0,901	0,19	1,50	0,94	39,96	1,65
	700	0,960	0,85	1,63	0,59	40,99	1,99

Endocarpo de macaúba	300	0,938	1,18	1,28	0,75	26,84	3,86
	500	0,887	0,30	1,37	0,70	35,36	1,02
	700	0,945	1,02	1,64	0,58	42,29	0,85

C.V. = Coeficiente de variação (%).

4.4.1. Densidade relativa aparente do carvão

A Tabela 28 apresenta os dados médios da densidade relativa aparente do carvão.

TABELA 28. Valores médios da densidade relativa aparente do carvão.

Materiais	Temperaturas de carbonização (°C)	Médias (g/cm ³)
Madeira de eucalipto	300	0,300
	500	0,296
	700	0,289
Endocarpo de babaçu	300	0,988
	500	0,901
	700	0,960
Endocarpo de macaúba	300	0,938
	500	0,887
	700	0,945

A Figura 9 apresenta as curvas da densidade relativa aparente do carvão das diversas matérias-primas, em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

Espécies	Equação	R ²
Eucalipto	DA = 0,3086 - 0,0001T	0,8778
Babaçu	DA = 1,389 - 1,891.10 ⁻³ T + 1,825.10 ⁻⁶ T ²	0,986
Macaúba	Da = 1,219 - 1,342.10 ⁻³ T + 1,359.10 ⁻⁶ T ²	0,923

FIGURA 9. Densidade relativa aparente do carvão (DA), em relação à temperatura de carbonização (°C).

O carvão produzido a 300°C foi mais denso que o carvão produzido a 500°C. A explicação disto é que no intervalo de temperatura entre 300 e 500°C, ocorreu uma perda de massa devido à liberação de matérias voláteis, sem ocorrer uma redução significativa nas dimensões do carvão. Na faixa de temperatura entre 500 e 700°C, ocorreu uma perda de massa, mas verificou-se uma contração bastante significativa nas dimensões do carvão, provocando, com isto, aumento da densidade. Para o carvão de madeira de eucalipto, entretanto, não se observou tal comportamento.

Quanto maior a densidade da matéria-prima original, maior foi a densidade do carvão produzido, sendo que o carvão do endocarpo do babaçu foi o material que apresentou maior densidade relativa aparente e a temperatura de 300°C foi a que mais se destacou.

A alta densidade relativa aparente do carvão dos endocarpos de macaúba e de babaçu apresentaram correlação positiva com as densidades das matérias-primas. Tais resultados estão de acordo com os obtidos por PETROFF e DOAT (1978), BRITO e BARRICHELO (1978), JUVILLAR (1980), OLIVEIRA e ALMEIDA (1980) e OLIVEIRA *et alii* (1982d).

A Tabela 29 apresenta a análise de variância para a densidade relativa aparente do carvão.

TABELA 29. Análise de variância para a densidade relativa aparente do carvão.

Causa de variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	1,6464	48875,50**
Temperatura (T)	2	0,0074	220,21**
Interação (M x T)	4	0,0022	66,69**

Temperatura d. Material 1	2	0,0040	118,39**
Temperatura d. Material 2	2	0,0078	231,76**
Temperatura d. Material 3	2	0,0001	3,46**

Material d. Temperatura 1	2	0,5871	17429,90**
Material d. Temperatura 2	2	0,4772	14166,10**
Material d. Temperatura 3	2	0,5865	17412,90**

Tratamento	8	0,4146	12307,30**
Resíduo	27	0,0001	
Total	35		

C.V. = 0,80

Material: 1 = Endocarpo de macaúba 2 = Endocarpo de babaçu 3 = Madeira de eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C; 2 = 500°C; 3 = 700°C

Com base nos valores de F obtidos na análise de variância, verificou-se um efeito muito forte de tratamento. A interação entre os fatores material e temperatura também apresentou significância estatística ao nível de 1% de probabilidade. No presente trabalho, as matérias-primas influíram muito mais nos resultados que as temperaturas.

O comportamento das médias dos tratamentos para a densidade relativa aparente do carvão é apresentado a seguir. Os tratamentos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, através do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

B.300	B.700	M.700	M.300	B.500	M.500	E.300	E.500	E.700
(0,988)	(0,960)	(0,945)	(0,938)	(0,901)	(0,887)	(0,300)	(0,296)	(0,289)

4.4.2. Densidade relativa verdadeira do carvão

A Tabela 30 apresenta os dados médios da densidade relativa verdadeira do carvão.

TABELA 30. Valores médios da densidade relativa verdadeira do carvão.

Materiais	Temperaturas de carbonização (°C)	Médias (g/cm ³)
Madeira de eucalipto	300	1,43
	500	1,46
	700	1,72
Endocarpo de babaçu	300	1,38
	500	1,50
	700	1,63
Endocarpo de macaúba	300	1,28
	500	1,37
	700	1,64

A Figura 10 apresenta as curvas da densidade relativa verdadeira do carvão em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

Espécies	Equação	R ²
Eucalipto	$\text{LOG}(\text{DV}) = 0,1967 + 0,0005T$	0,8298
Babaçu	$\text{LOG}(\text{DV}) = 0,1986 + 0,0004T$	0,9913
Macaúba	$\text{LOG}(\text{DV}) = 0,0474 + 0,0006T$	0,9350

FIGURA 10. Densidade relativa verdadeira do carvão (DV), em relação à temperatura de carbonização (°C).

A densidade relativa verdadeira aumentou sistematicamente com a elevação da temperatura de carbonização, indicando um aumento de "concentração da matéria carbonosa" no carvão vegetal. Este aumento foi mais acentuado na faixa de temperatura entre 500 e 700°C, comportamento este explicado em função de um possível rearranjo dos átomos de carbono, resultando numa estrutura mais ordenada. Conforme já foi discutido anteriormente, o aumento da temperatura provoca uma maior concentração de carbono no carvão.

O carvão da madeira de eucalipto apresentou os valores mais elevados para a densidade relativa verdadeira, em vista do material apresentar maior facilidade de eliminar líquidos e gases, concentrando, em sua estrutura, um material puro e próximo do carbono elementar. Os materiais com maiores densidades aparentes, principalmente o endocarpo de macaúba, apresentaram valores bem inferiores para a densidade verdadeira do carvão, o que sugere uma maior dificuldade na eliminação de gases, evitando, assim, o rearranjo dos átomos de carbono, conforme propõem OLIVEIRA *et alii* (1982b).

Para todos os materiais observou-se altíssima correlação entre o logaritmo da densidade relativa verdadeira do carvão e as temperaturas estudadas.

A Tabela 31 apresenta a análise de variância para a densidade relativa verdadeira do carvão.

TABELA 31. Análise de variância para a densidade relativa verdadeira do carvão.

Causa de variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	0,0345	337,21**
Temperatura (T)	2	0,2827	2759,64**
Interação (M x T)	4	0,0074	71,76**

Temperatura d. Material 1	2	0,1362	1329,85**
Temperatura d. Material 2	2	0,0613	598,13**
Temperatura d. Material 3	2	0,1000	975,24**

Material d. Temperatura 1	2	0,0225	219,74**
Material d. Temperatura 2	2	0,0170	165,99**
Material d. Temperatura 3	2	0,0097	95,03**

Tratamento	8	0,0830	810,09**
Resíduo	27	0,0001	
Total	35		

C.V. = 0,68

Material: 1 = Endocarpo
de
macaúba

2 = Endocarpo
de
babaçu

3 = Madeira de
eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C

2 = 500°C

3 = 700°C

.91.

Com base nos valores de F da análise de variância, observou-se um forte efeito de tratamento. A interação entre os fatores material e temperatura apresentou significância estatística ao nível de 1% de probabilidade. No presente trabalho, as temperaturas influíram muito mais nos resultados que as matérias-primas.

O comportamento das médias dos tratamentos para a densidade relativa verdadeira do carvão é apresentado a seguir: os tratamentos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, através do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

E.700	M.700	B.700	B.500	E.500	E.300	B.300	M.500	M.300
(1,72)	(1,64)	(1,63)	(1,50)	(1,46)	(1,43)	(1,38)	(1,37)	(1,28)

4.4.3. Porosidade do carvão

A Tabela 32 apresenta os dados médios da porosidade do carvão.

TABELA 32. Valores médios para a porosidade do carvão.

Materiais	Temperaturas de carbonização (°C)	Médias (%)
Madeira de eucalipto	300	79,00
	500	79,74
	700	83,14
Endocarpo de babaçu	300	28,49
	500	39,96
	700	40,99
Endocarpo de macaúba	300	26,84
	500	35,36
	700	42,29

A Figura 11 apresenta as curvas da porosidade do carvão em relação à temperatura de carbonização, bem como os modelos matemáticos que melhor se ajustaram às curvas.

A porosidade traduz a quantidade de vazios presentes no material poroso, em termos de porcentual de volume. O aumento da temperatura de carbonização expulsa o material volatilizável do carvão, deixando vazios ou poros no seu interior. Assim, a porosidade do carvão está diretamente correlacionada com a temperatura de carbonização.

FIGURA 11. Porosidade do carvão (P0), em relação à temperatura de carbonização (°C)

A maior variação encontrada no intervalo de temperatura entre 300 e 500°C para o carvão de endocarpo de babaçu e macaúba é explicada pela maior extração de voláteis sem ocorrer uma contração significativa nas dimensões do carvão. No intervalo de temperatura entre 500 e 700°C, o efeito de contração do carvão, por ser mais acentuado que o efeito de perda de massa, concorre para um maior aumento na densidade relativa verdadeira do que o observado na densidade relativa aparente, justificando, assim, uma menor variação na porosidade.

A natureza do material que caracteriza os endocarpos de babaçu e de macaúba é indicativa de sua baixa permeabilidade e a difusão dos gases é bastante difícil pela presença de poros muito pequenos e muito fechados. Os altos valores de porosidade para o carvão da madeira de eucalipto se justificam pelos baixos valores de sua densidade aparente, revelando ser um material bem mais permeável e apresentando mais poros no seu interior que as outras espécies.

Para o endocarpo de macaúba e a madeira de eucalipto observou-se que com o aumento da temperatura houve aumento na porosidade, segundo um modelo estatístico linear. O mesmo fato ocorreu para o endocarpo de babaçu mas segundo um modelo estatístico hiperbólico.

A Tabela 33 apresenta a análise de variância para a porosidade do carvão.

TABELA 33. Análise de variância para a porosidade do carvão.

Causa de variação	G.L.	Q.M.	F
Material (M)	2	2989.3555	26513.10**
Temperatura (T)	2	136.0742	1206.87**
Interação (M x T)	4	16.5008	146.35**

Temperatura d. Material 1	2	88.1729	782.02**
Temperatura d. Material 2	2	70.3916	624.32**
Temperatura d. Material 3	2	10.5156	93.26**

Material d. Temperatura 1	2	1281.9766	11370.01**
Material d. Temperatura 2	2	867.9365	7697.88**
Material d. Temperatura 3	2	872.4473	7737.89**

Tratamento	8	789.6078	7003.17**
Resíduo	27	0.1128	
Total	35		

C.V. = 0.73

Material: 1 = Endocarpo
de
macaúba2 = Endocarpo
de
babaçu3 = Madeira
de
eucalipto

Temperatura: 1 = 300°C;

2 = 500°C ;

3 = 700°C

Os valores obtidos para F na análise de variância indicam que os tratamentos, os fatores material e temperatura, bem como as suas interações, apresentaram significância estatística ao nível de 1% de probabilidade. Neste trabalho, as matérias-primas influíram muito mais nos resultados que as temperaturas.

O comportamento das médias dos tratamentos para a porosidade do carvão, expresso em $\text{arc sen } \sqrt{\%}/100$, é apresentado a seguir. Os tratamentos seguidos pela mesma barra não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si, através do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

E.700	E.500	E.300	M.700	B.700	B.500	M.500	B.300	M.300
(65.76)	(63.25)	(62.72)	(40.56)	(39.81)	(39.20)	(36.48)	(32.26)	(31.20)

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados, pode-se concluir que:

a. os endocarpos de palmáceas apresentaram maiores rendimentos em carvão e menores rendimentos em gás não-condensável, quando comparados com a madeira de eucalipto. O rendimento em líquido condensado, por sua vez, apresentou os maiores valores para o endocarpo de babaçu, seguindo-se a madeira de eucalipto e, finalmente, o endocarpo de macaúba.

b. a madeira de eucalipto produziu carvões com valores superiores para a densidade verdadeira, porosidade e teores de carbono fixo. Por outro lado, apresentou carvão com valores inferiores para a densidade aparente, rendimento em carbono fixo e teores de cinzas. Quanto ao teor de voláteis nos carvões os resultados se mostraram decrescen

tes na ordem: endocarpo de macaúba, madeira de eucalipto e endocarpo de babaçu.

c. a densidade aparente, teor de voláteis e rendimento gravimétrico de carvão das três espécies se mostraram inversamente correlacionados com a temperatura e, os demais parâmetros, diretamente correlacionados com a mesma.

d. a temperatura que possibilitou a obtenção de carvão com melhores rendimentos e padrões de qualidade foi a de 500°C para todas as espécies ensaiadas.

e. o carvão de endocarpo das palmáceas necessitou de temperaturas mais elevadas para atingir os padrões de qualidade semelhantes aos obtidos para o carvão de madeira de eucalipto, em razão das diferenças das composições químicas.

f. O carvão de endocarpo das palmáceas pode ser considerado superior ao carvão de madeira de eucalipto para usos, tais como: gasogênios, operações metalúrgicas e siderúrgicas e uso doméstico.

6. LITERATURA CITADA

ABRACAVE - Boletim Informativo. Belo Horizonte, 1984. 20 p.

AGRIMA - *Projeto Babaçu*. São Luís, AGRIMA, 1971. 57 p.

ALMEIDA, J.M. Efeito da temperatura sobre rendimento e propriedades dos produtos da carbonização de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden. Viçosa, 1983. 40 p. (Tese Mestrado - UFV).

ALVIM, P.T. *Agricultura nos trópicos úmidos: potencialidades e limitações*. Ilhéus, CEPLAC, 1975. 11 p.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL. Rio de Janeiro, IBGE, 1983.

APROVADO carvão de babaçu para as usinas siderúrgicas. *Amazônia*, São Paulo, 3(34): 32-4, jan. 1978.

ARENS, K. Sobre a origem sistemática dos frutos do coqueiro de catarro. *Boletim do Instituto de Óleos*, Rio de Janeiro 17: 103-12, 1958

BALLONI, E.A. *et alii*. Produção de energia através de florestas de rápido crescimento. *O Papel*, São Paulo: 55-61, abr., 1981.

BLANKENHORN, P.R. *et alii*. Porosity and pore size distribution of blackcherry carbonized in a inert atmosphere. *Wood Science* 11(1): 23-9, 1978.

BONDAR, G. *Palmeiras do Brasil*. São Paulo, Instituto de Botânica, Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, 1964. 159 p.

BRASIL. Secretaria de Tecnologia Industrial. *Coco de Babagú: matéria-prima para produção de álcool e carvão*. Brasília, MIC/STI, 1977.

BRITO, J.O. e BARRICHELO, L.E.G. *Comportamentos isolados de lignina e da celulose da madeira frente à carbonização*. Piracicaba, IPEF, s.d. 9 p. (datilografado).

- BRITO, J.O. e BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. *Boletim informativo IPEF*, Piracicaba, 5(14) : 19-28, jul., 1977.
- BRITO, J.O. *et alii*. Correlações entre características físicas e químicas de madeira e produção de carvão vegetal: densidade básica da madeira x densidade aparente do carvão. *Boletim informativo IPEF*, Piracicaba, 6(16): 1-9, jul. 1978.
- BRITO, J.O. *et alii*. Análise da produção energética de carvão vegetal de nove espécies de eucalipto. *Silvicultura*, São Paulo, 8(28): 742-4, jan/fev., 1982.
- CETEC. *Relatório Técnico Interno*. Belo Horizonte, 1983. 18 p.
- COLLET, F. Estudo comparativo, em escala de laboratório, de diversas madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal. *Boletim da Associação Brasileira de Metais*, 42(12): 5-14, 1955.
- DUPONT, G. *Distillation du bois*. Gauthier, Villars e Cie., Paris, 1924.
- EARL, D.E. *Forest energy and economic development*, Oxford, Claredon Press. 1975, 128 p.

- EIRA, A.F. e SOUZA, N.L. Aparato de precisão para medição do volume para blocos de madeira de formato irregular. *Summa Phytopathologica*, Jaboticabal, 10(1/2): 34, jan/jun., 1984.
- ELIAS, C.A. *Fabricação de carvão vegetal*, Rio de Janeiro, Serviço de Informação Agrícola. Ministério da Agricultura, 1961. 43 p.
- FARIA, W.L.F. *A jurema-preta (Mimosa hostilis Benth.) como fonte energética do semi-árido do Nordeste - Carvão*. Curitiba, 1984, 113 p. (Tese-Mestrado-UFP).
- FERREIRA, J.V. e MELO, M.A.L. Possibilidade de aproveitamento do coco babaçu na siderúrgica. *Metalurgia*, ABM, São Paulo, 31(209): 271-6, abr. 1975.
- FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. *IPEF*, Piracicaba (2/3): 65-74, 1971.
- GLESSINGER, E. *A próxima era da madeira*. São Paulo, Grijalbo, 1968. 267 p.
- GOLDEMBERG, J. Alcool de madeira. *Publicação ACIESP*, São Paulo, (18): 81-93, 1979.
- GOLDSTEIN, I.S. *Wood technology: chemical aspects*. Washington, American Chemical Society, 1978. 372 p.

- GOLDSTEIN, I. Perspectivas para el futuro: produtos químicos derivados de la madera. *Unasyuva*, Roma, 31 (125): 2-9, 1979.
- GOMES, P.A.F. e MATOS, M. *Comunicação Interna*. Belo Horizonte. CETEC, 1978. 18 p.
- GOMES, P.A. e OLIVEIRA, J.B. Teoria da carbonização da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte, CETEC, 1980. p. 27-42.
- HARRIS, A.C. Charcoal production. In: WORLD FORESTRY CONGRESS, 8. Jakarta, 1978. 15 p.
- JUVILLAR, J.B. Carvão vegetal, matéria-prima energética. In *Indústria e Produtividade*, Rio de Janeiro (137):23-26, jan/fev,1980.
- JUVILLAR, J.B. Fabricação de carvão vegetal. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, Rio de Janeiro 5(2):22-32, jun.1981.
- LAXAMANA, N.B. Proximate chemical analyses of charcoal from some Philippine woods. *Forpride Digest*, Laguna, 7(2/3): 48-53, jan/jun, 1980.
- LIMA, A.F.; RÔDES, L. e PHILIPP, P. Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica. In: SENAI - IPT. *Celulose e Papel*, São Paulo, 1981. p. 123-164.

MACHADO, M.A.C. A melhor árvore ... para o melhor carvão.
Silvicultura, São Paulo, 6(18): 48-50, mai/jun, 1981.

MAGALHÃES, J.G.R. Reflorestamento com *Eucalyptus* para produção de carvão: a experiência da Florestal Acesita S/A, Belo Horizonte, 74 p.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Uso de madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte, 1980. p. 9-26.

MARTINS, H. *Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais*. Belo Horizonte, CETEC, 1983.

MELLO, M.G. O eucalipto é destacado como opção energética.
Jornal de Brasília, Brasília, 27 de março, 1977.

MENDES, M.G.; GOMES, P.A. e OLIVEIRA, J.B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Produção e utilização de carvão vegetal*. Belo Horizonte, 1982. p. 75-90.

MOORE, G.R. *et alii*. Some physical properties of birch carbonized in a nitrogen atmosphere. *Wood and Fiber* 6(3): 193-9, 1978.

NOVAES, R.J. *Contribuição para o estudo do coco macaúba*. Piracicaba, 1952. 98 p. (Tese Doutorado-ESALQ).

O EMPREGO do babaçu como combustível para o gasogênio. *Boletim do Ministério da Agricultura*, Rio de Janeiro, 28 (10-2): 79, out/dez. 1939.

OLIVEIRA, R.G. *Situação atual e perspectivas do Projeto Babaçu*. Rio de Janeiro, IBS, agos., 1977. 31 p.

OLIVEIRA, J.B. *et alii*. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Produção e utilização de carvão vegetal*. Belo Horizonte, 1982a. p. 59-74.

OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A. e ALMEIDA, M.R. Estudos preliminares de normalização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Carvão vegetal*, Belo Horizonte, 1982b. p. 7-38.

OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A. e ALMEIDA, M.R. Propriedades do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Carvão vegetal*, Belo Horizonte, 1982c. p. 39-62.

OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A. e ALMEIDA, M.R. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Carvão vegetal*, Belo Horizonte, 1982d. p. 63-102.

OLIVEIRA, J.V.; GOMES, P.A. e MENDES, M.G. Otimização do processo de carbonização da madeira e do coco babaçu em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Carvão vegetal*. Belo Horizonte, 1982e. p. 103-30.

OPARINA, L.V. *et alii*. SB TR. UNII GRIDOLIZA RAST MATER 19: 176-B6. From ABIPC.

PEIXOTO, A.R. *Plantas oleaginosas arbóreas*. São Paulo, Livraria Nobel, 1973. 248 p.

PENEDO, W.R. Madeira, carvão e gusa. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Uso de madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte, 1980. p. 113-42.

PETROFF, G. e DOAT, J. La carbonization des bois tropicaux. *Bois et Forêts des Tropiques*, Nogent-sur-Marne, (159): 55-72, jan./fev. 1975.

PETROFF, G. e DOAT, J. Pirolise des bois tropicaux: influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. *Bois et forêts des tropiques*, Nogent-sur-Marne, (177): 51-64, jan/fev. 1978.

RAMALHO, A.M. *Carvões vegetais para gasogênios*. Lisboa, Ministério da Economia. Comissão Reguladora do Comércio de Carvões, 1943. 110 p.

- ROCHA, O. da. O coco macaúba. *Revista da Agricultura*, Piracicaba, 21(9): 345-58, 1946.
- ROCHA, M.R. e BOCCIARELLI, F. Emprego do coque babassu em cubilô. In: CONGRESSO ANUAL ABM, 2, Belo Horizonte, 1946. p. 157-64.
- ROLIM, A.R.B. Óleos vegetais: usos gerais. *Informe agropecuário*. EPAMIG, Belo Horizonte, (82): 17-22, out. 1981.
- SATONAKA, S. Carbonization and gaseification of wood. In: *Energy from forest biomass*. New York. Academic Press. 1982. p. 147-54.
- SHAFIZADEH, F.; SARKANEN, K.V.; TILLMAN, D.A. *Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins*. Academic Press. N.York. 1976. 320 p.
- SILVA, A.R. *et alii*. *Coco de babaçu: matéria-prima para alimentos e combustíveis*. São Luiz, Universidade Federal do Maranhão, 1977. 28 p.
- SILVEIRA, G.C.V.M. Aspectos econômicos da produção de carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Produção e utilização de carvão vegetal*. Belo Horizonte, 1982. p. 113-124.

- SLOCUM, D.H.; MC GINNES, E.A. e BEALL, F.C. Charcoal yield, shrinkage and density changes during carbonization of oak and hickory woods. *Wood science*, Madison, 1: 42-7, 1978.
- TENÓRIO, E.C. *O babaçu e coqueiros assemelhados em Minas Gerais*. Belo Horizonte, 1982, 216 p.
- THOMAS, R.J. Wood: structure and chemical composition. In: SYMPOSIUM ON WOOD TECHNOLOGY: CHEMICAL ASPECTS. São Francisco, 1976. American Chemical Society, 1977. p. 1-23.
- UHART, E. *A floresta amazônica: Fonte de energia*. Belém, SUDAM, 1976. 144 p.
- VIDAL, J.W.B. Coco de babaçu, matéria-prima para a produção de álcool e carvão. *Atualidades do CNP*, Brasília, 9(57): 76-97, nov/dez, 1977.
- VIVACQUA FILHO, A. *Petróleo e coque metalúrgico do babaçu e macaúba*. Belo Horizonte, 1979. 27 p. (não publicado).
- WENZL, H.F.J. *The chemical technology of wood*. New York, Academic Press, 1970. 692 p.
- WISNIEWSKI, A. e MELO, C.F.M. *Babaçu e a crise energética*, Belém, EMBRAPA/CPATU, 1981. 25 p.

APÊNDICE

TABELA 34. Dados de rendimentos dos produtos da destilação da carbonização de diversos materiais e temperaturas.

Material	T°C	Rendimento (%) base seca		
		carvão	líquido condensado	gás não cond.
Madeira de eucalipto	300	37,20	42,28	20,52
		36,00	41,22	22,78
		36,36	41,66	21,98
		38,18	41,48	20,34
	500	29,10	43,40	27,50
		29,90	41,32	28,78
		30,86	42,84	26,30
		30,66	43,98	25,36
	700	28,62	45,48	25,90
		29,78	44,52	25,70
		28,60	44,26	27,14
		28,40	45,26	26,34
Endocarpo de babaçu	300	37,50	42,72	19,78
		37,40	40,72	21,88
		39,20	41,40	19,40
		38,42	41,28	20,30
	500	31,94	43,52	24,54
		32,20	43,14	24,66
		30,84	44,16	25,00
		31,88	42,68	25,44
	700	30,58	47,00	22,42
		30,40	45,80	23,80
		30,40	45,64	23,96
		31,16	44,68	23,86
Endocarpo de macaúba	300	43,94	33,60	22,46
		43,92	32,80	23,28
		45,00	31,94	23,06
		44,00	34,62	20,88
	500	38,54	35,72	25,74
		37,96	36,68	25,36
		37,90	36,38	25,68
		38,22	35,88	25,90
	700	35,20	40,32	24,48
		35,20	39,56	25,24
		36,20	38,76	25,04
		35,88	39,92	24,20

TABELA 35. Análise imediata e rendimento em carbono fixo do carvão de diversos materiais e temperaturas.

Materiais	T ^o C	Análise química imediata (%)			Rto. em C.Fixo%
		Voláteis	Cinzas	Carbono fixo	
Madeira de eucalipto	300	30,54	0,65	68,81	25,60
		30,05	0,67	69,27	24,94
		30,00	0,58	69,41	25,24
		30,12	0,41	69,47	26,54
	500	9,38	1,56	89,06	25,92
		10,52	0,66	88,82	26,56
		8,14	0,91	90,95	28,07
		9,59	0,96	89,45	27,43
	700	4,43	0,94	94,62	27,08
		5,24	1,10	93,91	27,97
		4,81	1,19	94,00	26,88
		4,51	1,20	94,28	26,78
Endocarpo de babaçu	300	34,39	4,47	61,14	22,93
		34,30	4,48	61,22	22,90
		34,87	4,35	60,78	23,83
		34,80	4,19	61,01	23,44
	500	9,25	5,82	84,92	27,12
		9,38	5,99	84,63	27,25
		9,08	6,05	84,86	26,17
		9,16	6,27	84,57	26,96
	700	3,54	6,77	89,68	27,42
		3,73	6,45	89,81	27,30
		3,50	6,64	89,86	27,32
		3,74	6,71	89,54	27,90
Endocarpo de macauba	300	37,58	1,55	60,86	26,74
		37,74	1,68	60,57	26,60
		38,17	1,27	60,53	27,24
		38,63	1,40	59,94	26,67
	500	11,24	2,09	86,66	33,39
		9,87	2,84	87,29	33,14
		11,51	2,42	86,06	32,62
		10,45	2,23	87,31	33,37
	700	6,43	3,19	90,38	31,81
		6,43	3,24	90,33	31,80
		5,90	3,23	90,80	32,87
		5,86	3,59	90,55	32,49

TABELA 36. Densidade relativa aparente e verdadeira e porosidade do carvão de diversos materiais e temperaturas.

Material	T ^o C	Densidade relativa (g/cm ³)		Porosidade %
		Aparente	Verdadeira	
Madeira de eucalipto	300	0,301	1,42	78,80
		0,298	1,44	79,30
		0,300	1,43	79,02
		0,302	1,43	78,88
	500	0,296	1,47	79,86
		0,293	1,45	79,79
		0,296	1,45	79,59
		0,298	1,47	79,73
	700	0,291	1,71	82,98
		0,288	1,73	83,35
		0,288	1,72	83,26
		0,291	1,71	82,98
Endocarpo de babaçu	300	0,988	1,38	28,41
		0,985	1,38	28,62
		0,986	1,37	28,03
		0,988	1,39	28,92
	500	0,901	1,49	39,53
		0,898	1,52	40,92
		0,902	1,50	39,87
		0,901	1,49	39,53
	700	0,960	1,62	40,74
		0,950	1,64	42,07
		0,970	1,62	40,12
		0,961	1,63	41,04
Endocarpo de macaúba	300	0,926	1,29	28,22
		0,934	1,28	27,03
		0,941	1,27	25,91
		0,952	1,29	26,20
	500	0,891	1,38	35,43
		0,885	1,36	34,93
		0,887	1,37	35,26
		0,886	1,38	35,80
	700	0,945	1,63	42,02
		0,955	1,65	42,12
		0,932	1,63	42,82
		0,948	1,64	42,20