

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

CARVÃO DE RESÍDUOS DE INDÚSTRIA MADEIREIRA DE TRÊS ESPÉCIES
FLORESTAIS EXPLORADAS NO MUNICÍPIO DE PARAGOMINAS, PA

Marcela Gomes da Silva

Belém-PA
2004

70

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

CARVÃO DE RESÍDUOS DE INDÚSTRIA MADEIREIRA DE TRÊS ESPÉCIES
FLORESTAIS EXPLORADAS NO MUNICÍPIO DE PARAGOMINAS, PA

Marcela Gomes da Silva

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, área de concentração Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

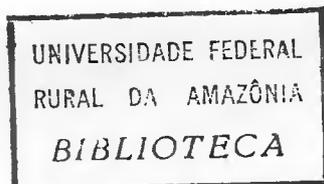
Orientador: Prof. Dr. Suelo Numazawa
Co-orientadora: Dra. Maristela Machado Araújo
Co-orientadora: Profa. Dra. Cristina Dibi Taxi

1283
Gese
02.1

Biblioteca



12830019



Belém-PA
2004

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

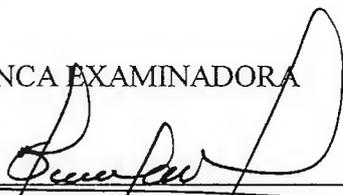
CARVÃO DE RESÍDUOS DE INDÚSTRIA MADEIREIRA DE TRÊS ESPÉCIES
FLORESTAIS EXPLORADAS NO MUNICÍPIO DE PARAGOMINAS, PA

Marcela Gomes da Silva

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural
da Amazônia, como parte das exigências do Curso de
Mestrado em Ciências Florestais, área de concentração
Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

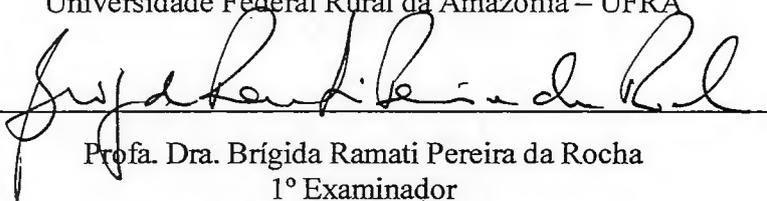
Aprovada em 27 de fevereiro de 2004

BANCA EXAMINADORA



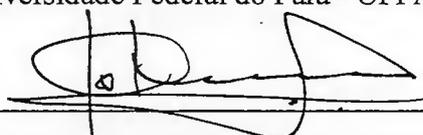
Prof. Dr. Suzo Numazawa
Orientador

Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

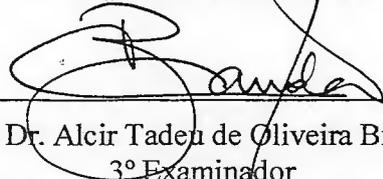


Profa. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha
1º Examinador

Universidade Federal do Pará - UFPA



Pesquisador Dr. João Olegário Pereira de Carvalho
2º Examinador
Embrapa Amazônia Oriental



Prof. Dr. Alcir Tadeu de Oliveira Brandão
3º Examinador

Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

Ao nosso **Deus,**

aos meus pais, **Astolfo Ferraz e Conceição,**

aos meus irmãos, **Marcos Aurélio, Márcia e Mércia.**

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Suelo Numazawa, pela orientação, compreensão e amizade.

À Dr^a Maristela Machado Araújo, por sua incansável e inesgotável ajuda na co- orientação e amizade.

À UFRA – Universidade Federal Rural da Amazônia e ao seu corpo docente, pela oportunidade de realizar este estudo.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pela concessão de bolsa de estudo.

À Empresa CIKEL BRASIL VERDE S/A, pelo apoio logístico e de pessoal destacadamente ao Srs. Damião Pereira Dias, André Furman, Zilmar, Roberto, Fátima Oliveira, ao pessoal da secretaria, aos operários da carvoaria e a todos que direta ou indiretamente contribuíram a para realização deste trabalho.

Ao Prof. M.Sc. Manoel Sebastião Pereira de Carvalho, pelo apoio, incentivo e amizade.

Ao Prof. Dr. Alcir Tadeu de Oliveira Brandão, pelo apoio, incentivo e amizade.

Ao pesquisador Dr. João Olegário, pela colaboração e incentivo para a realização deste trabalho.

Aos engenheiros florestais Gilvana Galvão, Fabrícia Lima, Regina de Jesus, Denise Cordeiro, Adriana Ribeiro e Carlos Nogueira pela amizade e estímulo.

À Coordenadoria do Curso de Pós-graduação em Ciências Florestais, em especial, à secretária Shirley pela ajuda e incentivo.

Aos amigos do Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais – LTPF/UFRA, destacadamente a Eliel Galvão, Thais Nagaishi, Milena Souza, Carla Daniela, Rubem Lobo e Varlindo Medeiros pelo apoio, colaboração e amizade.

A todos os meus colegas de turma de mestrado pelo companheirismo e convívio.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE FIGURAS	11
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. USO DA BIOMASSA FLORESTAL COMO FONTE DE ENERGIA	15
2.2. APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE INDÚSTRIAS MADEIREIRAS	16
2.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA	16
2.4. CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA E DESTILAÇÃO SECA DA MADEIRA	17
2.5. EVOLUÇÃO DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA	18
2.6. PRODUTOS OBTIDOS NA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA	19
2.7. CARBONIZAÇÃO E FATORES CONDICIONANTES	20
2.7.1. Temperatura de Carbonização	20
2.7.1.1. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal	21
2.7.1.2. Densidade aparente do carvão vegetal	22
2.7.1.3. Composição química do carvão vegetal	23
2.7.1.4. Poder calorífico superior do carvão	24
2.7.1.5. Friabilidade do carvão vegetal	25
2.7.2. Tempo de Carbonização	25
2.7.2.1. Rendimento gravimétrico do carvão	26
2.7.2.2. Densidade aparente do carvão vegetal	26
2.7.2.3. Composição química do carvão vegetal	27
2.7.2.4. Poder calorífico superior do carvão	28
2.7.2.5. Friabilidade do carvão vegetal	28
2.8. INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DA MADEIRA SOBRE A DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL	29
2.9. EFEITO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL	29
2.10. CONSTITUINTES QUÍMICOS DA MADEIRA QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL	30
3. MATERIAL E MÉTODOS	30

3.1.	ÁREA DE ESTUDO	30
3.2.	SELEÇÃO DAS ESPÉCIES	31
3.3.	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA	31
3.4.	CARBONIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE MADEIRA	33
3.4.1.	Determinação de rendimento gravimétrico	33
3.5.	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO	34
3.5.1.	Propriedades físicas	34
3.5.1.1.	Densidade a granel	34
3.5.1.2.	Densidade aparente do carvão	35
3.5.1.3.	Poder calorífico do carvão	36
3.6.	PROPRIEDADES QUÍMICAS	37
3.6.1.	Análises químicas imediatas do carvão	37
3.6.1.1.	Teor de materiais voláteis	37
3.6.1.2.	Teor de cinzas	37
3.6.1.3.	Teor de carbono fixo	38
3.7.	PROPRIEDADE MECÂNICA	39
3.8.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	40
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1.	DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA	41
4.2.	RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO VEGETAL	42
4.3.	PROPRIEDADES FÍSICAS DO CARVÃO VEGETAL	44
4.3.1	Densidade a granel	44
4.3.2.	Densidade aparente do carvão	46
4.3.3.	Poder calorífico superior do carvão	48
4.4.	PROPRIEDADES QUÍMICAS	49
4.4.1.	Materiais voláteis	49
4.4.2.	Teor de cinzas	52
4.4.3.	Teor de carbono fixo	54
4.5.	PROPRIEDADE MECÂNICA (FRIABILIDADE)	55
5.	CONCLUSÕES	59
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Constituição química da madeira observada em algumas pesquisas.	17
Tabela 2	Produtos obtidos na carbonização de madeiras.	19
Tabela 3	Propriedades do carvão vegetal produzido com diferentes temperaturas de carbonização.	20
Tabela 4	Influência da temperatura de carbonização no rendimento do carvão.	21
Tabela 5	Influência da temperatura de carbonização sobre a densidade do carvão.	22
Tabela 6	Composição elementar do carvão vegetal.	23
Tabela 7	Análise química do carvão de eucalipto na Austrália.	23
Tabela 8	Rendimento percentual em finos de carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.	25
Tabela 9	Análise química imediata do carvão em diferentes taxas de aquecimento.	27
Tabela 10	Densidade da madeira e a densidade do carvão de <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill, com idades entre 6 e 10 anos.	29
Tabela 11	Fatores e níveis adotados para as análises estatística de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias, Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	40
Tabela 12	Porcentagem média de rendimento gravimétrico em carvão de três espécies madeiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	43
Tabela. 13	Análise de variância do rendimento gravimétrico em carvão (g/cm^3) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	43
Tabela 14	Comparação de médias do rendimento gravimétrico em carvão (g/cm^3) pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeira carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	44
Tabela 15	Densidade a granel média do carvão (kg) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	45
Tabela. 16	Análise de variância da densidade a granel do carvão (g/cm^3) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	45
Tabela 17	Comparação de médias de densidade a granel do carvão (kg/m^3) pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	46

Tabela 18	Densidade aparente média do carvão (g/cm^3) de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	46
Tabela 19	Análise de variância da densidade aparente do carvão (g/cm^3) de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	47
Tabela 20	Comparação de médias de densidade aparente do carvão (g/cm^3) pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeireiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	47
Tabela 21	Média do poder calorífico superior de carvão (kJ/kg), de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	48
Tabela 22	Análise de variância do poder calorífico superior do carvão (kJ/kg), de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	49
Tabela 23	Porcentagem média dos materiais voláteis do carvão de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	50
Tabela 24	Análise de variância do teor de materiais voláteis contidos no carvão (%), de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	51
Tabela 25	Comparação de médias do teor de materiais voláteis contidos no carvão (%), pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeireira carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	51
Tabela 26	Porcentagem média de cinza de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	52
Tabela. 27	Análise de variância do teor de cinzas contidos no carvão (%), de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	53
Tabela 28	Comparação de médias do teor de cinzas contidos no carvão (%), pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeireira carbonizadas, em 7 e 10 dias, Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	53
Tabela 29	Porcentagem média de carbono fixo de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	54
Tabela 30	Análise de variância do teor de carbono fixo contidos no carvão (%), de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	55

Tabela 31	Comparação de médias do teor de carbono fixo contidos no carvão (%) , pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeireiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	55
Tabela 32	Porcentagem média da friabilidade de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	56
Tabela 33	Caracterização do carvão quanto a friabilidade.	56
Tabela 34	Análise de variância da friabilidade do carvão (%) de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	57
Tabela 35	Comparação de médias da friabilidade do carvão (%) , pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeireira carbonizadas, em 7 e 10 dias, Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Medição do volume do corpo de prova de madeira (princípio de Arquimedes) em uma balança analítica.	32
Figura 2.	Forno " <i>Rabo Quente</i> ".	33
Figura 3.	Medição do volume do corpo de prova de carvão (princípio de Arquimedes) em uma balança analítica.	36
Figura 4.	Bomba calorimétrica para determinação do poder calorífico do carvão.	36
Figura 5.	Carvão em forma de partículas para análise de materiais voláteis e teor de cinzas.	38
Figura 6.	Forno mufla para volatilização do carvão para análise de materiais voláteis e teor de cinzas.	38
Figura 7.	Tambor para determinação da friabilidade do carvão.	40

CARVÃO DE RESÍDUOS DE INDÚSTRIA MADEIREIRA DE TRÊS ESPÉCIES FLORESTAIS EXPLORADAS NO MUNICÍPIO DE PARAGOMINAS, PA

RESUMO

A exploração de espécies madeireiras na floresta amazônica gera grande quantidade de resíduo na indústria, a partir do beneficiamento das toras. No entanto, uma alternativa viável às empresas é a produção de carvão com características adequadas. Desta forma, este trabalho avalia as principais propriedades do carvão vegetal das espécies *Manilkara amazonica* (Huber) A. Chev. (maçaranduba), *Lecythis pisonis* Camb. (sapucaia) e *Piptadenia suaveolens* Miq. (timborana), carbonizadas em 7 e 10 dias, oriundos de indústria madeireira. O carvão foi produzido a partir de resíduos da serraria da empresa Cikel Brasil Verde S. A., na Fazenda Rio Capim, em Paragominas. Foi utilizada uma bateria de 30 fornos de alvenaria (tipo *rabo quente*), sendo 10 fornos para cada espécie, dos quais 5 fornos para carbonização em 7 dias e 5 para 10 dias. Após a carbonização, foram retiradas amostras de carvão produzido para estudo de rendimento gravimétrico e de propriedades físicas (densidade aparente, densidade a granel e poder calorífico), químicas (teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), e mecânicas (friabilidade). Para cada propriedade estudada foram feitas análises estatísticas através de delineamento completamente casualizado, em arranjo fatorial de 3 x 2, tendo cada tratamento 5 repetições. Os principais resultados foram o rendimento gravimétrico do carvão variou de 21,47 a 29,59% (base úmida); a densidade média a granel de 178,51 a 231,14 kg/m³; densidade média aparente de 0,38 a 0,53 g/cm³; poder calorífico de 23451 a 28830 kJ/kg; teor de materiais voláteis de 23,94 a 31,47%; cinzas de 0,7 a 2,5%; carbono fixo de 68,29 a 74,49%; e a friabilidade de 12 a 32,6%. Constatou-se que a espécie é o principal fator que influencia nas propriedades do carvão. Não foi possível distinguir o melhor carvão quando se avaliou as propriedades, uma vez que todas elas apresentam algumas características consideradas boas, porém, sempre acompanhadas de outras inadequadas.

Palavras-chave: carvão vegetal; maçaranduba; sapucaia; timborana; propriedades do carvão.

CHARCOAL FROM RESIDUES OF TIMBER INDUSTRY OF THREE TREE SPECIES LOGGED IN THE MUNICIPALITY DISTRICT OF PARAGOMINAS, PA

ABSTRACT

Logging timber species in the Amazonian forest generates a great amount of residue in the industry, since the improvement of the logs. However, a viable alternative to the enterprises is the production of charcoal with appropriate characteristics. In this way, this work evaluates the main properties of the charcoal of the species *Manilkara amazonica* (Huber) A. Chev. (maçaranduba), *Lecythis pisonis* Camb. (sapucaia) e *Piptadenia suaveolens* Miq. (timborana), charred in 7 and 10 days, originating from of timber's industry. The charcoal was produced from residues of timbers from the sawmill of Cikel Brazil Verde S. A., in Rio Capim farm, Paragominas. A series of 30 masonry ovens (type hot tail) was used, being 10 ovens for each species, of the which 5 ovens for carbonization in 7 days and 5 for 10 days. After the carbonization, samples of charcoal were produced for studying gravimetric revenue and physical properties (apparent density, density in bulk and calorific power); chemistries (tenor of volatile materials, ashes and fixed carbon); and mechanics (friableness). For each studied property, statistical analyses were made completely at random, in factorial arrangement of 3 x 2, being each treatment with 5 repetitions. The main results were: gravimetric revenue of the charcoal varied from 21,47 to 29,59% (humid base); the medium density in bulk from 178,51 to 231,14 kg/m³; apparent medium density from 0,38 to 0,53 g/cm³; calorific power from 23451 to 28830 kJ/kg; tenor of volatile materials from 23,94 to 31,47%; ashes from 0,7 to 2,5%; fixed carbon from 68,29 to 74,49%; and the friableness from 12 to 32,6%. It was noted that the species is the main factor that influences in the properties of the charcoal. It was not possible to distinguish the best charcoal when the properties were evaluated, once all of them present some characteristics considered good, however, always accompanied of other inadequate ones.

Keywords: charcoal; maçaranduba; sapucaia; timborana; properties of the charcoal.

1. INTRODUÇÃO

A madeira ainda é o produto mais comercializado da floresta. Para exploração da madeira em regiões de mata nativa, torna-se necessária a aplicação do manejo sustentado de florestas, mantendo, com isto, o equilíbrio ecológico. A utilização racional e eficiente dos recursos de biomassa, mediante o emprego de tecnologias modernas e a utilização de resíduos, é uma alternativa viável (BENZZO e LUENGO, 1998).

Dentre os produtos derivados da madeira, o carvão tem uma posição de destaque na geração de energia. A utilização da biomassa vegetal para fins energéticos deve ser considerada como alternativa de utilização dos recursos naturais existentes, sendo que a maioria da matéria-prima, para esse fim, é oriunda de florestas naturais.

A conversão integral de uma floresta tropical densa exclusivamente em carvão vegetal não seria admissível, tendo-se em vista a ocorrência de espécies de madeira para uso mais nobre. Seria justificado, sim, o aproveitamento de fontes disponíveis como madeiras remanescentes de exploração florestal, de resíduos industriais, entre outras (NUMAZAWA, 1986).

Atualmente, a produção de energia é uma necessidade incontestável, pois a busca por combustível, tanto no meio rural como no urbano, é crescente e tem levado à procura por energias alternativas, como o carvão vegetal, que além de ser um produto derivado de matéria-prima renovável, também pode ser utilizado como redutor de minérios em indústrias siderúrgicas, usinas termoelétricas e indústrias químicas.

A produção de carvão vegetal no Brasil é de significativa importância econômica e se desenvolve basicamente de duas maneiras: tradicional, empregando lenha de floresta nativa, cortada para transformação em áreas agrícolas; e moderna, carbonizando lenha de floresta plantada (NOGUEIRA e LORA, 2003).

As propriedades do carvão vegetal estão intimamente ligadas aos parâmetros do processo de produção e da matéria-prima que lhe deu origem. Existem várias pesquisas realizadas sobre o processo de produção de carvão vegetal, porém apenas em níveis laboratoriais e com espécies exóticas, principalmente eucalipto e pinus. Há, portanto, a necessidade de se buscar conhecimentos sobre o comportamento na carbonização de resíduos de espécies nativas da região amazônica, assim como sobre os métodos de controle de qualidade, em campo, permitindo assim caracterizar as propriedades do carvão

vegetal, oriundo de resíduos de exploração florestal e resíduo de indústrias madeireiras, considerando o grande desperdício dos mesmos.

Considerando estes aspectos, o presente trabalho teve como objetivo geral estudar as características físicas, químicas e mecânica do carvão de resíduo de madeira, produzido em diferentes tempos de carbonização.

Como objetivos específicos: carbonizar resíduos de três espécies processadas na indústria (maçaranduba, sapucaia e timborana); avaliar as características físicas concernentes à densidade e poder calorífico do carvão; avaliar as características químicas concernentes a teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo; avaliar a característica mecânica concernente a friabilidade do carvão.

Neste contexto justifica-se a execução deste trabalho pelo fato da empresa poder direcionar a sua produção de carvão, conforme a espécie e qualidade do produto gerado, de acordo com as necessidades da demanda industrial.

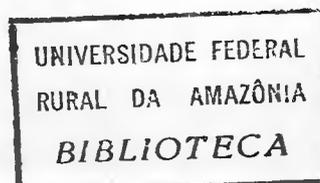
2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. USO DA BIOMASSA FLORESTAL COMO FONTE DE ENERGIA

Nos últimos 20 anos, a Amazônia tornou-se a principal região produtora de madeira do Brasil. Atualmente, a extração não planejada e o processamento ineficiente de toras conduzem à degradação da floresta e a grandes desperdícios de madeira (VIDAL et al., 1997).

A biomassa florestal possui características tais que permitem a sua utilização como fonte de energia, seja pela queima da madeira, como carvão, aproveitamento de resíduos da exploração e aproveitamento de óleos essenciais, alcatrão e ácidos pirolenhosos (COUTO et al., 2000).

Segundo Fontes et al. (2003), é considerável o crescimento da demanda mundial por energia e, conseqüentemente, há necessidade de substituir os combustíveis fósseis por alternativas viáveis. A utilização do resíduo de biomassa florestal como fonte de energia contempla a vocação natural do Brasil por suas características como clima tropical úmido, terras disponíveis, entre outras.



2.2. APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE INDÚSTRIAS MADEIREIRAS

O manejo dos recursos florestais não está restrito às atividades realizadas dentro da floresta. A eficiência no desdobro das toras em produtos finais (madeira serrada, lâminas, compensados, entre outros) pode influenciar no tamanho da área de floresta necessária para satisfazer a demanda por madeira processada (GERWING et al., 2000).

Conforme PNUD (2000), no final do século passado o Pará era o segundo estado com maior número de serrarias, sendo 1.099 microempresas, 578 empresas pequenas, 55 empresas de médio porte e 115 empresas de grande porte.

O rendimento da produção de madeira serrada varia de 40% a 65%, ou seja, cerca da metade da tora transforma-se em resíduos, dependendo do tipo de madeira e tecnologias empregadas (CARRÉ et al., 1992; VIDAL et al., 1997; VERÍSSIMO et al., 2002).

Atualmente, o resíduo produzido pela indústria madeireira não é mais considerado como um problema de dimensões econômicas, ecológicas e sociais. Há, hoje, no Brasil várias possibilidades de aproveitamento desse resíduo, desde a fabricação de peças (painéis) até o uso de geração de energia.

O aproveitamento do resíduo para geração de energia representa um dos segmentos mais importantes do modelo de desenvolvimento econômico e social, baseado no uso e na valorização da floresta, uma vez que se utiliza a matéria-prima que já se encontra disponível em abundância, reduzindo a pressão sobre as florestas e otimizando os seus recursos (BARBOSA et al., 2001).

2.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

A madeira é composta, principalmente, de carbono, hidrogênio e oxigênio. Além desses existem, ainda, o nitrogênio e os sais minerais que juntos não representam 1% do total (Tabela 1). Os átomos de carbono e oxigênio são responsáveis pela formação dos principais polímeros que compõem a estrutura da madeira: celulose, hemi-celulose e lignina, sendo estes os principais componentes que influenciam no processo de carbonização (Oliveira et al., 1982a). Os demais componentes da madeira, presentes em

menor quantidade, são compostos de baixo peso molecular chamados extrativos, encontrados notadamente na casca e englobando terpenos, óleos essenciais, resinas, fenóis, taninos, graxas e corantes (MARTINS, 1980).

Conforme Oliveira et al. (1982a), a composição química elementar da madeira varia de acordo com a espécie vegetal, idade do indivíduo, tipo de terreno (solo, declividade), clima, entre outros.

Tabela 1. Constituição química da madeira observada em algumas pesquisas.

Composição Química (%)	Klar (1925)	Kanvry et al. (1970)	Goldstein (1978)	Charles (1982)	Jones (s.d.)		Média Geral
					M _{S ar}	M _A	
Carbono	40,0	50,0	50,0	48,5-50,5	40,0	50,0	46,9
Oxigênio	34,2	43,5	44,0	43,0-45,0	34,0	42,5	40,8
Hidrogênio	4,8	6,0	6,0	6,0-7,0	4,8	6,0	5,7
Nitrogênio e cinzas			<1,0				<1,0
Nitrogênio		0,1			0,4	0,5	0,3
Cinzas	1,0	0,4			0,8	1,0	0,8
Água	20,0				20,0		20,0

M_{S ar}: Madeira seca ao ar; M_A: Madeira anidra. Adaptado por Oliveira et al. (1982a).

2.4. CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA E DESTILAÇÃO SECA DA MADEIRA

A carbonização ou destilação seca é o processo pelo qual a madeira é aquecida em ambiente fechado e na presença de quantidades controladas de oxigênio (ar), até sua decomposição parcial, resultando em duas partes: carvão e produtos voláteis, condensáveis ou não, denominados produtos da destilação da madeira. São utilizados dois termos equivalentes para o mesmo processo químico: carbonização, quando se objetiva a obtenção de carvão vegetal como produto mais importante; ou destilação seca, se a retenção de produtos químicos representa o fator econômico de maior importância (BRITO e BARICHELLO, 1981).

Numazawa (1983) caracterizou a carbonização como a transformação da madeira em carvão sob influência da temperatura e em presença de quantidade controlada de oxigênio, sendo que nesse processo os subprodutos (alcatrões, gases condensáveis e não condensáveis) não são utilizados, enquanto que na destilação todos os subprodutos são recuperados.

2.5. EVOLUÇÃO DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

Durante o processo de carbonização da madeira, ocorre uma série de transformações, relativamente complexas, onde muitos desses mecanismos de reações ainda não foram bem explicados.

A existência de um gradiente de temperatura, ao longo da peça de madeira em processo de carbonização, causa vários fenômenos simultâneos, em regiões diferentes na madeira, da porção externa para o interior da peça (FONTES, 1989).

Doat e Petroff (1975) descreveram a evolução teórica da destilação seca da madeira em uma retorta, nas seguintes fases: Fase A - com temperatura de 150 °C a 170 °C, caracteriza-se pela liberação de água contida na madeira; Fase B - com temperatura de 170 °C a 280 °C, quando ocorre a liberação de CO e CO₂, acompanhados de pequena quantidade de vapores condensáveis, contendo ácido acético, metanol e pouco alcatrão; Fase C - inicia-se a reação exotérmica de decomposição, liberando cerca de 210 quilocalorias por quilo de madeira, a qual ocorre numa faixa de temperatura de 280 a 300 °C. A composição dos gases se modifica, os gases oxigenados são reduzidos dando lugar ao metano e um pouco de hidrogênio e a formação de ácido acético, metanol, acetona, acetato, acetato de metila, álcool álcoo atingem seus valores máximo; e Fase D - corresponde à fase com temperatura de 400 °C, onde praticamente termina a carbonização. A partir dessa fase, se a temperatura for elevada, ocorre a dissociação do carvão. A liberação de hidrocarbonetos aumenta até 500 °C. A temperatura acima desse limite possibilita aos hidrocarbonetos serem substituídos pelo hidrogênio, sendo assim, denominada de fase do hidrogênio.

Os rendimentos em produtos voláteis condensáveis (alcatrões e carvão) variam conforme a performance da operação e a qualidade do carvão depende da temperatura máxima atingida.

2.6. PRODUTOS OBTIDOS NA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

Brito e Barichello (1981) relataram que, sob a ação do calor, os principais compostos da madeira (celulose, hemicelulose e lignina) se degradam, formando produtos de natureza sólida (carvão), líquida (ácido pirolenhoso) e gasosa (gases não condensáveis).

A quantidade e qualidade dos produtos gerados variam de acordo com a velocidade de aquecimento (ou reação) do processo e também com as condições do ambiente no qual se processa a carbonização, tais como, teor de oxigênio livre, pressão e temperatura (Almeida e Rezende, 1982). Além dos compostos principais, Beall e Eickner (s.d.) observaram que mais de 200 compostos diferentes são formados na carbonização ou na destilação seca da madeira.

Uhart (1976) estudou a carbonização da madeira de 16 espécies da Amazônia e observou aspectos quali-quantitativos, sob temperatura de 500 °C, conforme se pode verificar na Tabela 2.

Tabela 2. Produtos obtidos na carbonização de madeiras da Amazônia.

Produtos	Rendimento (base seca) %
Produto sólido	
- Carvão vegetal	33,72
Produto Líquido	
-Ácido acético	5,73
-Acetona +ácido fenico	1,44
-Metanol	2,50
-Acetato de metila	0,56
-Etil-metil-cetona	0,05
-Fenol + cresol	0,75
-Gaiacol	0,45
-Produtos orgânicos diversos	10,50
-Água	26,60
Produtos gasosos	
CO, CO ₂ , H ₂ , hidrocarbonetos	17,50
Total	100,00

Fonte: Uhart (1976)

As porcentagens do rendimento em carvão, líquido pirolenhoso e gases incondensáveis, variam conforme as espécies (Brito e Barichello, 1981) e as técnicas de

carbonização empregadas na destilação a seco da madeira (WENZL, 1970; BRITO e BARICHELO, 1981; OLIVEIRA et al., 1982b)

2.7. CARBONIZAÇÃO E FATORES CONDICIONANTES

Os fatores condicionantes da carbonização que influenciam diretamente nas diversas propriedades do carvão vegetal são temperatura e o tempo de carbonização.

2.7.1. Temperatura de carbonização

A temperatura é uma das variáveis mais relevantes, que influenciam nas propriedades do carvão vegetal como: rendimento, densidade, composição química, entre outras. Nogueira e Lora (2003) constataram que a composição, propriedades físicas e químicas, e quantidade de carvão vegetal produzido dependem da temperatura de carbonização (Tabela 3).

Tabela 3. Propriedades do carvão vegetal produzido com diferentes temperaturas de carbonização.

Temperatura °C	Cinzas (%)	Voláteis (%)	Carbono (%)	Poder Calorífico (kj/kg)	Produção de Carvão (% massa)
300	0,4	70,8	28,8	22,40	56,27
400	2,4	30,9	66,7	29,88	28,03
500	1,4	17,7	80,9	32,14	22,65
600	2,9	7,1	90,0	33,20	21,63
700	2,0	3,9	94,1	33,40	20,22
800	2,0	2,4	95,6	33,90	19,54

Fonte: Biomass Conversion and Tecnology *apud* Nogueira e Lora (2003).

A influência da temperatura no rendimento do carvão, no líquido pirolenhoso e gases incondensáveis é facilmente deduzida, pois quanto maior for a temperatura de carbonização maior será o grau de destilação, refletindo, portanto, no aumento da quantidade de gases e, conseqüentemente, no menor rendimento do peso do carvão.

2.7.1.1. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

O rendimento gravimétrico consiste no rendimento em peso do carvão em relação ao peso da lenha enforada, expresso em porcentagem.

Veado et al. (1977) ao carbonizar madeiras de *Eucalyptus marginata*, sob temperaturas de 450 °C e 650 °C, obtiveram rendimento em carvão na ordem de 35% e 28%, respectivamente. O decréscimo no rendimento do carvão está em função do aumento da temperatura (ALMEIDA, 1982; OLIVEIRA et al, 1982a; GOMES e OLIVEIRA, 1980).

Harris (1978) e Oliveira et al. (1982a), estudando carbonização de madeira de *Eucalyptus* spp. mostraram diferentes valores de rendimento do carvão em função da temperatura (Tabela 4).

Tabela 4. Influência da temperatura de carbonização no rendimento do carvão.

Temperatura – (°C)	Rendimento em carvão (%)	
	Oliveira (1982)	Harris (1978)
200	91,80	
300	51,40	
400	37,80	40,00
450		35,00
500	31,00	
550		31,50
600	29,10	
650		28,00
700	27,80	
800	26,70	
900	26,60	
1000	26,80	
1100	26,10	

Adaptação: Harris (1978) e Oliveira (1982)

O decréscimo no rendimento é explicado pelo fato do aumento da temperatura facilitar a dissociação do carvão, com a liberação dos gases, bem como gaseificar parte da estrutura sólida (ALMEIDA, 1982).

2.7.1.2. Densidade aparente do carvão vegetal

A densidade do carvão vegetal está relacionada com a perda de massa e a contração volumétrica que a madeira sofre durante a carbonização. É uma propriedade bastante importante e, quando não ocorrer em prejuízo para as outras propriedades, deve ser a maior possível (FONTES, 1989).

Segundo Krila (1980), a maior perda de massa e contração volumétrica da madeira ocorre na faixa de temperaturas entre 200 °C a 400 °C.

Blankenhorn et al. (1978) observaram que a densidade do carvão produzido com madeiras de *Prunus serotina* Erth apresentou variação sob diferentes temperaturas, tendo registrado os menores valores sob 500 °C e 600 °C (Tabela 5).

Tabela 5. Influência da temperatura de carbonização sobre a densidade do carvão.

Temperatura (°C)	Densidade aparente do carvão (g/cm ³)
320	0,412
500	0,408
600	0,402
700	0,415
800	0,489
900	0,414

Adaptado: Blankenhorn et al. (1978)

Mendes et al. (1982) observaram comportamentos semelhantes da densidade aparente do carvão, utilizando madeira de *Eucalyptus grandis* W.Hill, carbonizadas sob temperaturas de 300 °C, 500 °C e 700 °C. Os menores valores foram obtidos com carvões produzidos sob temperatura de 500 °C.

Além da temperatura de carbonização, a espécie também influencia na densidade aparente do carvão.

2.7.1.3. Composição química elementar do carvão vegetal

A composição química elementar do carvão varia sensivelmente com a temperatura de carbonização (WENZL, 1970).

Bergstrom e Wesslen *apud* Oliveira e Almeida (1980) observaram variações Na composição elementar do carvão ao carbonizarem madeiras duras em diferentes temperaturas (Tabela 6).

Tabela 6. Composição elementar do carvão vegetal.

Temperatura de carbonização (°C)	Composição Elementar (%)		
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio
200	52,3	6,3	41,4
300	73,2	4,9	21,9
400	82,7	3,8	13,5
500	89,2	3,1	6,7
600	92,8	2,6	5,2
700	92,8	2,4	4,8
800	95,7	1	3,3
900	96,1	0,7	3,2
1000	96,6	0,5	2,9

Fonte: Bergstrom e Wesslen (1978).

Harris (1978), ao carbonizar madeiras de *Eucalyptus* sp. na Austrália, encontrou valores percentuais de carbono fixo no carvão diretamente proporcionais à temperatura, porém os materiais voláteis foram inversamente proporcionais e as cinzas não diferiram (Tabela 7).

Tabela 7. Análise química do carvão de eucalipto na Austrália.

Temperatura de carbonização (°C)	Análise química imediata do carvão (%)		
	Carbono Fixo	Materiais voláteis	Cinzas
400	78,0	21,5	0,5
450	82,0	17,5	0,5
550	88,5	11,0	0,5
650	95,0	4,5	0,5

Fonte: Harris (1978)

2.7.1.4. Poder calorífico superior do carvão

Mendes et al. (1982) definem poder calorífico como o número de calorias liberadas numa combustão completa por uma unidade de massa, para combustíveis sólidos e líquidos expresso em kcal/kg e para gasosos em kg/m^3 .

Satonaka (1982) relatou que o poder calorífico do carvão vegetal atinge seu valor máximo em temperaturas entre 500 e 600 °C.

Bayleys e Blankenhorn (1982) afirmaram que o poder de combustão do carvão aumenta proporcionalmente com a temperatura de carbonização. O processo contínuo de carbonização eleva o conteúdo de carbono fixo, conseqüentemente, aumentando o calor de combustão.

Conforme Oliveira et al. (1982a), o carvão produzido na temperatura de 500 °C apresenta maior calor de combustão do que aquele produzido a 300 °C. Isto ocorre devido ao maior acúmulo de carbono fixo e elevado calor de combustão dos materiais voláteis. Por outro lado, o carvão produzido a 700 °C, apesar de apresentar maior acúmulo de carbono fixo em relação ao de 500 °C, apresenta decréscimo do calor de combustão, o que os autores consideram ser devido à pequena quantidade de materiais voláteis de elevado calor de combustão.

De acordo com Satonaka (1982), a redução do poder calorífico superior do carvão, em temperaturas maiores do que 600 °C, possivelmente ocorre devido ao efeito da diminuição da porcentagem de hidrogênio em relação ao aumento do carbono fixo.

Earl (1974) relatou que o poder calorífico do carvão é praticamente equivalente ao de carbono. Carvão com alto teor de materiais voláteis, possivelmente, terá menor poder calorífico do que aquele com menor teor que, conseqüentemente, apresentará maior teor de carbono.

2.7.1.5. Friabilidade do carvão vegetal

A friabilidade do carvão vegetal é a propriedade que este possui de gerar finos (partículas dissociadas), quando sujeito à abrasão, transporte e outras formas de manuseio. Esta propriedade varia em função da temperatura final de carbonização.

Mendes et al. (1982), ao carbonizarem madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill, com mesma idade e teor de umidade, nas temperaturas de 300, 500 e 700°C, avaliaram a produção de finos menores de 13mm, e constataram 13,2, 14,6 e 12,9%, respectivamente. A geração de finos foi máxima para a temperatura de 500°C e mínima para a temperatura de 700°C. Por outro lado, Coutinho e Ferraz (1988) observaram que a quantidade de finos é diretamente proporcional ao aumento da temperatura de carbonização, ou seja, quanto maior for a temperatura maior será a quantidade de finos produzidos (Tabela 8).

Tabela 8. Rendimento percentual em finos de carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

Temperatura °C	Finos abaixo de 13mm (%)
400	9,2
500	9,6
600	10,5
700	14,2
800	15,9
900	18,7
1000	20,2

Fonte: Coutinho e Ferraz (1988)

2.7.2. Tempo de carbonização

Existem duas formas para caracterizar o tempo de carbonização: o tempo gasto na elevação da temperatura até o patamar final de carbonização, em função da taxa de aquecimento; e o tempo de permanência da temperatura no patamar final de carbonização, quando se trata de carbonização em escala laboratorial onde as variáveis podem ser perfeitamente controladas. No que concerne a carbonização em fornos de alvenaria, o

tempo se refere ao travamento (abafamento) do forno para controlar a entrada de ar, variável responsável pela continuação ou paralisação da carbonização.

2.7.2.1. Rendimento gravimétrico do carvão

Na medida em que a taxa de aquecimento aumenta, o rendimento do carvão decresce. Madeira de *Betula* sp. carbonizada sob 400 °C, utilizando quatro taxas de aquecimentos correspondentes a 133,3 °C/hora; 50 °C/hora; 25 °C/hora e 1,19 °C/hora, resultaram em 25,51%; 30,85%; 33,18% e 39,44%, respectivamente, em carvão (WENZL, 1970).

Oliveira e Almeida (1980) também verificaram essa mesma tendência, ao carbonizarem madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill, sob temperatura de 430 °C, utilizando quatro taxas de aquecimentos de 1 °C/minuto; 2,3 °C/minuto; 2,3 °C/hora e 6 °C/hora, onde encontraram os seguintes resultados de rendimento em carvão: 35,0%, 34,1%, 40,0% e 40,8%, respectivamente.

No entanto, quanto maior a taxa de aquecimento e/ou o tempo de permanência no patamar final de carbonização, menor é o rendimento em carvão. Esses resultados vêm concordar em parte com a argumentação de Gomes e Oliveira (1980), os quais citam que quanto maior for a quantidade de gases produzidos, menor será o peso do carvão.

2.7.2.2. Densidade aparente do carvão vegetal

Um dos parâmetros que está relacionado com a densidade aparente do carvão é a perda de massa. Nanassy e Fung (1975) ressaltaram que a temperatura e tempo de pirólise fazem variar o percentual dessa perda, e observaram que, para temperaturas superiores a 400 °C, existe certa tendência à estabilização da perda de massa, a partir de trinta minutos, e que o tempo de carbonização, provavelmente, foi o fator mais relevante para a perda de massa na faixa de zero a trinta minutos.

Segundo Mendes et al. (1982), o tempo de carbonização influencia na densidade aparente do carvão vegetal, pois carvão obtido através de uma rápida carbonização (duas horas) apresentou menor densidade (0,46 g/cm³) do que aquele obtido em lenta carbonização (setenta e duas horas- 0,70 g/cm³).

Contudo, o tempo de carbonização, assim como a temperatura, influencia na densidade do carvão vegetal, sendo que esta propriedade é mais influenciada pela carbonização com alta taxa de aquecimento, ou seja, carbonização rápida.

2.7.2.3. Composição química do carvão vegetal

Os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, segundo algumas pesquisas, sofrem pouca influência com o tempo de carbonização. Entretanto, Oliveira et al. (1982a) observaram que na medida em que a taxa de aquecimento aumenta, os teores de carbono fixo também aumentam e os materiais voláteis decrescem (Tabela 9).

Tabela 9. Análise química imediata do carvão em diferentes taxas de aquecimento.

Taxa de Aquecimento	Carbono fixo	Análise química (%)	
		Materiais voláteis	Cinzas
1,0 ° C/min.	78,45	20,62	0,93
2,3 ° C/min.	79,15	19,94	0,91
2,3 ° C/hora	76,63	22,04	1,33
6,0 ° C/hora	78,70	20,30	1,00

Fonte: Oliveira et al (1982a)

Ao carbonizar madeiras sob diferentes temperaturas (250 °C a 750 °C) e tempos de carbonização (6 a 12 horas), Korobkin (1950) verificou que o teor de carbono fixo foi maior para o carvão obtido sob o tempo de doze horas do que o de seis horas.

Lamaxana (s.d), *apud* Numazawa (1986), verificou que a quantidade de materiais voláteis é uma função do tempo de carbonização. Assim, a variação dos teores de carbono fixo e materiais voláteis ocorre tanto em função da velocidade de aquecimento como do tempo em que a madeira é submetida à carbonização. Gomes e Oliveira (1980) relataram que a quantidade de gases liberados na carbonização da madeira está em função do grau de destilação.

Numazawa (1986) e Aquino (2003), ao carbonizarem espécies tropicais da Amazônia encontraram uma variação de 0,43 a 1,76 % respectivamente de cinzas para carvões produzidos em temperaturas entre 400 e 600 °C.

2.7.2.4. Poder calorífico superior do carvão

Se o tempo de carbonização da madeira influencia nos teores de carbono fixo Korobkin (1950) e materiais voláteis Numazawa (1986), acredita-se que ele também influencia o poder calorífico do carvão, considerando que depende do calor de combustão dos respectivos componentes químicos.

Numazawa (1986) carbonizou madeiras a 10 e 30 minutos no patamar final de carbonização e verificou que os valores do poder calorífico superior do carvão foram maiores no tempo de 30 minutos.

O poder calorífico superior do carvão vegetal aumenta à medida que a porcentagem de carbono fixo se eleva (PETROFF E DOAT, 1978). Com relação à influência dos materiais voláteis no poder calorífico do carvão, esses autores observaram que os carvões que apresentam as porcentagens na faixa de 13% a 14% desses produtos voláteis liberam maior quantidade de energia durante a combustão.

2.7.2.5. Friabilidade do carvão vegetal

Não foi encontrada literatura sobre a influência do tempo de carbonização na friabilidade do carvão.

Mendes et al. (1982), estudando a friabilidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill a 430 °C, observaram que a uma taxa de carbonização de 0,1 °C a produção de finos menores de meia polegada, gerados por tamboramentos, foi de 11%, enquanto a 3,4 °C resultou em 18%.

Este resultado mostra a influência da velocidade de carbonização sob a friabilidade do carvão, considerando que quanto maior a velocidade de aquecimento mais friável será o carvão, ou seja, o carvão será menos estável que o produzido em carbonização lenta.

2.8. INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DA MADEIRA SOBRE A DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL

A densidade da madeira é a relação entre o seu peso e o seu volume. Geralmente o peso é expresso em gramas ou toneladas e o volume em centímetro cúbico ou metro cúbico. A mesma relação caracteriza a densidade do carvão vegetal.

A literatura cita que a densidade da madeira tem correlação direta com a densidade do carvão vegetal, portanto quanto maior for a densidade da madeira, maior será a densidade do carvão (NUMAZAWA, 1986). Este padrão pode ser constatado na Tabela 10, que apresenta resultados de GOMES e OLIVEIRA (1980).

Tabela 10. Densidade da madeira e densidade do carvão de *Eucalyptus grandis*, W. Hill, com idades entre 6 e 10 anos.

Densidade Relativa da madeira, em t/m^3	Densidade Aparente Relativa do carvão, em t/m^3
0,60	0,32
0,64	0,39
0,71	0,41

Fonte: Gomes e Oliveira (1980).

2.9. EFEITO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

O teor de umidade é outra variável que influencia na produção de carvão vegetal em processo de combustão parcial. Earl (1974) carbonizou várias madeiras com diferentes teores de umidade e observou que quanto maior era a porcentagem dessa variável menor era a produção de carvão em kg/volume estéreo, levando maior tempo para carbonizar. Referente a este aspecto, Oliveira et al. (1982) explicam que quanto mais alto for o teor de umidade na madeira, maior será a quantidade de energia necessária para evaporar a água,

durante o processo de carbonização, conseqüentemente, aumentando o tempo desta e reduzindo o rendimento em peso do carvão.

Mendes et al. (1982), ao carbonizarem madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill, com diferentes teores de umidade, constataram que quanto maior era o teor de umidade da madeira maior era a quantidade de finos gerados no teste de tamboramento, concordando com Karchesy e Koch (1979) que asseguram que o teor de umidade exerce influência na qualidade e produção econômica do carvão vegetal.

Beaumont (1981) cita que o aumento da umidade da madeira causa um aumento no rendimento em carvão e redução em licor pirolenhoso. O autor explica que a umidade promove um atraso na pirólise devido à necessidade da madeira ser inicialmente aquecida, para evaporação da água contida nos seu interior, para finalmente ocorrer a pirólise.

2.10. CONSTITUINTES QUÍMICOS DA MADEIRA QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL

A celulose, hemicelulose e lignina, assim como os extrativos, são fatores que influenciam no rendimento em carvão.

Quanto maior for a porcentagem de celulose e pentosanas, menor será o rendimento. Por outro lado, quanto maior for a porcentagem de lignina e extrativos, maior será o rendimento (PETROFF e DOAT, 1978).

É importante ressaltar que os teores de carbono fixo e materiais voláteis influenciam no poder calorífico superior do carvão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

O material estudado originou-se da Fazenda Rio Capim, de propriedade da Empresa Cikel Brasil Verde S.A., localizada no município de Paragominas, distante cerca de 320 km de Belém. Entre as coordenadas geográficas 3° 30' e 3° 45' de latitude sul e 48° 30' e

48° 45' de longitude a oeste de Greenwich. O município de Paragominas está localizado no nordeste do Estado do Pará, na microrregião homogênea Guajarina, (WATRIN e ROCHA 1992).

Bastos (1972) e Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia-SUDAM descreveram o clima da região de Paragominas como do tipo Aw, caracterizado por tropical chuvoso com estação seca bem definida, segundo a classificação de Köppen. As temperaturas médias mensais variam de 25 °C a 28 °C. As chuvas são abundantes no período de dezembro a maio, quando o excedente hídrico é de 282 mm. O déficit hídrico é de 512 mm e ocorre entre os meses de junho e dezembro.

A vegetação natural da região foi classificada, de acordo com o IBGE (1992), em Floresta Ombrófila Densa Submontana, Floresta Ombrófila Densa e terras Baixas e Ombrófila Densa Aluvial.

3.2. SELEÇÃO DAS ESPÉCIES

Para este estudo foram selecionadas as espécies *Manilkara amazonica* (Huber) A.Chev. (maçaranduba), *Lecythis pisonis* Cambess. (sapucaia) e *Piptadenia suaveolens* Miq. (timborana), tomando-se como base a maior disponibilidade de resíduos na indústria no período em que se desenvolveu o trabalho, além de serem espécies frequentes na floresta da empresa.

3.3. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA

Do lote de resíduos de cada espécie selecionada foram coletadas, aleatoriamente, 20 (vinte) amostras de madeira de cada fornada, num total de 200 (duzentos) unidades, as quais foram enviadas ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), em Belém, onde foram preparados 20 (vinte) corpos de prova de cada amostra coletada com dimensão de 2 x 2 x 3 cm.

A densidade da madeira foi determinada com base na Norma MB 1269/79 da Associação Nacional de Normas Técnicas - ABNT (Figura 1), através da Equação 1:

$$\rho = \frac{P_o}{V_{(sat)}} \quad (\text{Equação 1})$$

Considerando que,

- ρ - densidade básica (g/cm^3).
- P_o - peso do corpo de prova absolutamente seco (g).
- $V_{(sat)}$ - volume do corpo de prova saturado (cm^3).

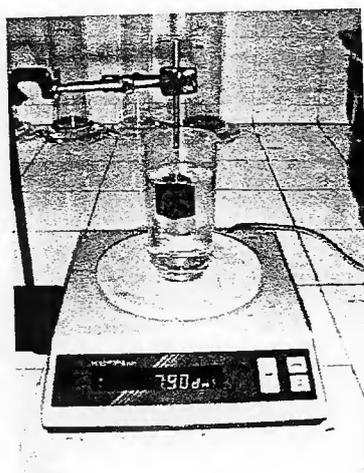


Figura 1. Medição do volume do corpo de prova de madeira (princípio de Arquimedes), em uma balança analítica.

A saturação dos corpos de prova foi realizada, submergindo a madeira em água destilada dentro de um dessecador acoplado a uma bomba a vácuo. A completa saturação foi alcançada no momento em que o peso do corpo de prova não sofreu mais variação em três pesagens consecutivas.

O volume do corpo saturado foi determinado através do método de pesagem baseado no princípio de Arquimedes, recomendado pela Comissão Panamericana de Normas Técnicas- COPANT 461, conforme mostrado na Figura 1.

Após a determinação do volume saturado do corpo de prova, este foi submetido à secagem em uma estufa com 103 ± 2 °C até atingir a estabilização do peso em três pesagens consecutivas, condição em que caracteriza a ausência completa de água na parede celular, correspondente ao peso do corpo de prova absolutamente seco (0% de umidade).

3.4. CARBONIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE MADEIRA

A carbonização foi realizada em fornos de alvenaria tipo “*Rabo Quente*” (Figura 2), utilizados pela empresa, com capacidade volumétrica nominal de 16 m³, adotando-se a técnica tradicional de carbonização empregada pela empresa.

Neste estudo, foram utilizados dez fornos para cada espécie, sendo cinco para o ciclo de carbonização de 7 dias e outros cinco para o ciclo de 10 dias. Para estimar o peso do carvão produzido foi contado o número de balaios cheios de carvão. Em seguida determinou-se a média do peso de cinco balaios para, então calcular o peso total de carvão obtido por fornada.

Para os estudos de caracterização das propriedades do carvão, coletou-se em um saco de 60 kg a amostra de carvão de cada fornada, que foram encaminhadas ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da UFRA, onde foram realizados os testes.

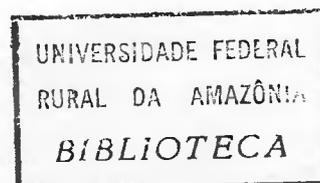
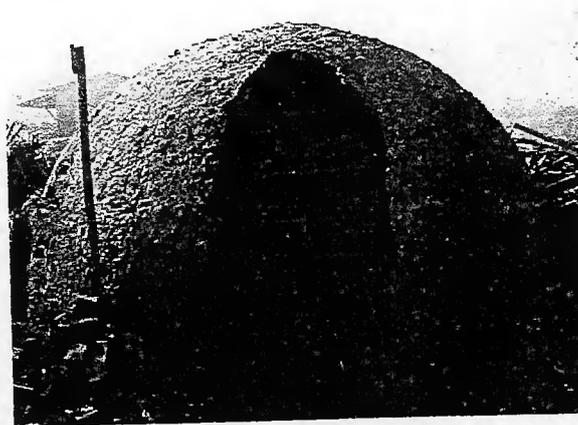


Figura 2: Forno “*Rabo Quente*”.

3.4.1. Determinação de rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico consistiu na relação entre o peso do carvão produzido e o peso da madeira enforada, expresso em porcentagem e calculado através da equação 2.

$$RGc = \frac{P_{carvão}}{P_{madeira}} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Considerando que,

RGc - rendimento gravimétrico de carvão (%).

$P_{carvão}$ - peso do carvão produzido (kg).

$P_{madeira}$ - peso da madeira enfiada (kg).

O peso do carvão foi obtido com base no número de balaios e o peso médio de cinco balaios preenchidos de carvão. O peso da madeira enfiada foi obtido com base no produto entre o volume nominal do forno e a densidade média da madeira.

Portanto, o rendimento é um valor que foi calculado apenas como referência teórica mas que expressa a relação entre o produto sólido formado (carvão) e a madeira enfiada.

3.5. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO

Foi feita a caracterização das propriedades física, química e mecânica (friabilidade) do carvão vegetal.

3.5.1. Propriedades físicas

3.5.1.1. Densidade a granel

A densidade a granel expressa o peso dos pedaços de carvão contidos em um recipiente de 1m^3 de volume. Neste estudo utilizou-se um baiao com capacidade em torno de $0,2\text{m}^3$. De cada fornada, tomou-se amostras de carvão para encher cinco balaios que foram pesados em uma balança com capacidade de 100 kg. A densidade a granel foi calculada através da equação 3.

$$D_{gran.} = \frac{P_{carvão}}{V_{recip.}} \quad (\text{Equação 3})$$

Considerando que,

$D_{gran.}$ - Densidade a granel do carvão (g/cm^3).

$P_{carvão}$ - Peso do carvão (kg).

$V_{recip.}$ - Volume do recipiente (m^3).

3.5.1.2. Densidade aparente do carvão

Das amostras de carvão coletadas de cada fornada foram preparados 10 corpos de prova para determinação da densidade básica, adaptando-se a Norma MB 1269/79 da ABNT, através da equação 4.

$$D_{(ap.c.)} = \frac{P_{(c.s.)}}{V_{(c.sat.)}} \quad (\text{Equação 4})$$

Considerando que,

$D_{(ap.c.)}$ - Densidade aparente do carvão (g/cm^3).

$P_{(c.s.)}$ - Peso do carvão seco (g).

$V_{(c.sat.)}$ - Volume do carvão saturado (g/cm^3).

O peso e o volume do carvão foram determinados da mesma maneira como foi determinada a densidade básica da madeira, no item 2.3. (Figura 3).



Figura 3. Medição do volume do corpo de prova de carvão (princípio de Arquimedes), em uma balança analítica.

3.5.1.3. Poder calorífico do carvão

Adotou-se a Norma D250/50 da ASTM – (American Society for Testing and Material), para a determinação do poder calorífico superior do carvão. Foram utilizadas três amostras de cada fornada; e o poder calorífico foi determinado em uma bomba calorimétrica adiabática (Figura 4), pelo método de Berttelot, que consiste na combustão do material em um ambiente fechado, na presença de oxigênio e sob pressão.

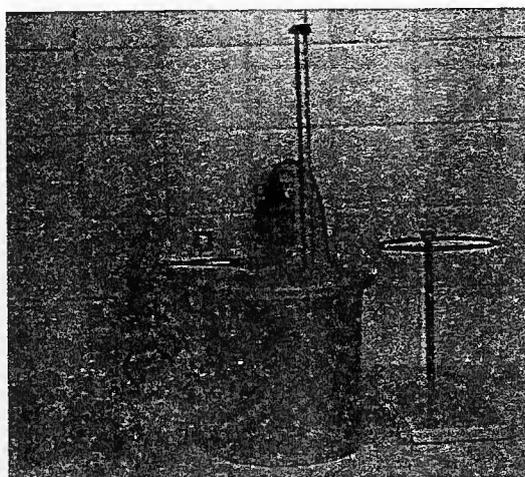


Figura 4. Bomba calorimétrica para determinação do poder calorífico do carvão.

3.6. PROPRIEDADES QUÍMICAS

3.6.1. Análises químicas imediatas do carvão

As análises químicas do carvão vegetal se referem à determinação da porcentagem dos teores de materiais voláteis (TMV), de cinzas (Tci) e de carbono fixo (TCF) contidos no carvão, com base na Norma D1762/64 da ASTM.

O material utilizado foi codificado por fornada, transformado em partículas utilizando-se um gral e o carvão foi classificado granulometricamente entre 24 e 32 mesh. Geralmente essas partículas são obtidas por meio de processo mecânico.

3.6.1.1. Teor de materiais voláteis

Utilizou-se três cadinhos com tampas para cada amostra de carvão, anotando-se o peso dos mesmos: $P_{(cad1)}$, $P_{(cad2)}$, $P_{(cad3)}$. Em seguida, pesou-se cerca de 3 gramas de carvão moído (Figura 5) e peneirado em peneiras de 24 e 32 mesh, submetendo, posteriormente, à calcinação em um forno mufla a 950 °C, durante 6 minutos (Figura 6). O teor de materiais voláteis foi determinado através da equação 5.

$$TMV = \left(\frac{P_{(c.s.)} - P_{(c.cal.)}}{P_{(c.s.)}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Considerando que,

TMV - Teor de materiais voláteis (%).

$P_{(c.s.)}$ - Peso das partículas de carvão seco em estufa a $103^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ (g).

$P_{(c.cal.)}$ - Peso das partículas de carvão calcinado a 950 °C durante 6 minutos (g)

3.6.1.2. Teor de cinzas

Utilizou-se três cadinhos sem tampas, os quais foram pesados em uma balança analítica, registrando-se seus pesos de $P_{(cad1)}$, $P_{(cad2)}$, $P_{(cad3)}$. Posteriormente foram pesados

em cada cadinho cerca de 2 gramas das amostras de carvão moído, com a mesma granulometria do carvão utilizado para materiais voláteis. Em seguida, os cadinhos sem tampa foram submetidos à combustão completa sob temperatura de 750 °C durante 6 horas, e o teor de cinzas foi calculado através da equação 6 (Figura 5 e 6).

$$TCi = \frac{P_{(ci)}}{P_{(c.s.)}} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Considerando que,

TCi - Teor de cinzas (%).

$P_{(ci)}$ - Peso do material incinerado (cinzas) a 750 °C durante 6 horas (g).

$P_{(c.s.)}$ - Peso das partículas de carvão seco em estufa à 103° ± 2°C (g).



Figura 5. Carvão em forma de partículas para análise de materiais voláteis e teor de cinzas

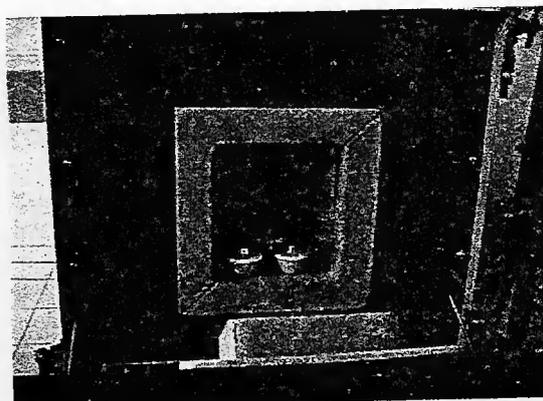


Figura 6. Forno mufla para volatilização do carvão para análise de materiais voláteis e teor de cinzas

3.6.1.3. Teor de carbono fixo

A partir da obtenção de materiais voláteis e de cinza, o teor de carbono fixo foi determinado indiretamente através da equação 7.

$$TCF = 100 - (TMV + TCi) \quad (\text{Equação 7})$$

Considerando que,

TCF-Teor de carbono fixo (%).

TMV-Teor de materiais voláteis (%).

TCi - Teor de cinzas (%).

3.7. PROPRIEDADE MECÂNICA

A propriedade mecânica do carvão (friabilidade) consiste na resistência do mesmo para se transformar em partículas e pó, devido ao seu manuseio (descarregamento, embalagem e transporte). É determinada através do teste de tamboramento, de acordo com a Norma MB 1375/80 da ABNT.

Utilizou-se amostras aleatórias de carvão, passadas em uma peneira com malha de 5 x 5 cm de seção transversal e retidas em outra com malha de 2 x 2 cm. O comprimento do carvão variou de 5 a 10 cm. Para o teste de friabilidade, utilizou-se cerca de 500 g de carvão, correspondendo ao peso inicial do carvão (P_i). Posteriormente, as amostras foram submetidas a choque e atrito a 30 rpm, em um tambor, por 10 minutos (Figura 7). Após o tamboramento, todo o carvão retido na peneira com malha de 2 x 2 cm, foi pesado, correspondendo ao peso do carvão remanescente (P_r); e a friabilidade foi calculada através da equação 8.

$$F = \frac{P_i - P_r}{P_i} \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

Considerando que,

F - Friabilidade do carvão (%).

P_r - Peso do carvão remanescente após o tamboramento (g).

P_i - Peso inicial do carvão (g).

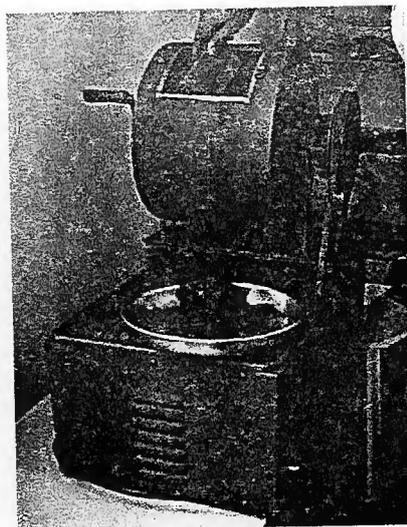


Figura 7. Tambor para determinação da friabilidade do carvão.

3.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Considerando a utilização de delineamento completamente casualizado, realizou-se a análise estatística através de tratamentos fatoriais 3 x 2, conforme indicados na Tabela 11, sendo que as repetições corresponderam aos cinco fornos utilizados no estudo.

Primeiramente, foram feitos estudos de homogeneidade de variância pelo teste de Cochran e de normalidade na distribuição dos dados pelo teste de Lilliefors. Após a verificação desses parâmetros, então, realizou-se a análise de variância e o teste de significância pelo método de SNK ao nível de 5% de probabilidade, através do Programa Sistema para Análise Estatística - SAEG.

Tabela 11. Fatores e níveis adotados para as análises estatísticas de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Fator	Nível	Especificação
A (espécie)	a ₀	maçaranduba - <i>Manilkara amazonica</i> (Huber) A. Chev.
	a ₁	sapucaia - <i>Lecythis pisonis</i> Cambess.
	a ₂	timborana - <i>Piptadenia suaveolens</i> Miq.
B (tempo de carbonização)	b ₀	7 dias
	b ₁	10 dias

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

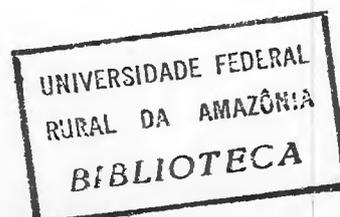
Os resultados de rendimento gravimétrico, densidade aparente, teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão, apresentaram homogeneidade da variância e normalidade dos dados, o que permitiu análise de variância, com tratamentos fatoriais. A densidade a granel, poder calorífico e friabilidade tiveram seus valores transformados por logaritmo neperiano, quando então foi possível satisfazer as condições básicas para tal análise.

4.1. DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA

Nos testes de densidade básica da madeira, observou-se que a maçaranduba apresentou densidade média de $0,86 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$; sapucaia $0,91 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, e timborana $0,75 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$. Os resultados obtidos estão dentro ou próximos dos limites dos encontrados na literatura, Por exemplo, de Souza et al. (1997) encontraram para maçaranduba ($0,83 \text{ g/cm}^3$), timborana ($0,76 \text{ g/cm}^3$) e sapucaia ($0,84 \text{ g/cm}^3$), IBDF (1988) de $0,89$ a $0,93 \text{ g/cm}^3$ e Aquino (2003) de $0,91 \text{ g/cm}^3$ para madeira de maçaranduba.

Tais variações entre os estudos são explicadas por Harris (1965), quando cita que as diferentes densidades para uma mesma espécie variam conforme a procedência do material e variação entre árvores na própria área. Este aspecto é importante para a produção de carvão, considerando que a densidade da madeira tem relação direta com a densidade do carvão.

As madeiras de maçaranduba e sapucaia, de acordo com Souza et al. (1997), são consideradas madeiras pesadas enquanto que timborana é classificada como madeira de densidade média.



4.2. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO VEGETAL

Na Tabela 12, encontram-se os valores de rendimento em carvão das três espécies estudadas. Constata-se uma variação de rendimento entre 21,47% e 29,55%. À exceção do rendimento em carvão obtido com a madeira de timborana carbonizada em sete dias que apresentou rendimento de 29,55%, os demais foram inferiores aos de Pastore et al. (1989) que encontraram, em escala laboratorial, entre 27% e 37% com vinte espécies da Amazônia.

Outros autores como Oliveira et al. (1989) e Vale et al. (1997) ao estudarem o *Eucalyptus grandis*, espécie mais utilizada como matéria-prima para carvão vegetal, encontraram valores de 35% e 33%, respectivamente, bem acima dos que foram encontrados neste trabalho. Porém, isto é compreensível, uma vez que, os estudos realizados por esses autores foram todos em escala laboratorial e calculados à base seca, enquanto que neste estudo, os resultados estão expressos à base úmida e o carvão foi produzido em escala industrial, obedecendo exatamente à técnica empregada pelo produtor.

No que faz alusão a tempo de carbonização, esperava-se que no ciclo de dez dias resultasse em menor rendimento, uma vez que uma maior exposição ao processo pirolítico significa um maior grau de volatilização. No entanto, no caso das espécies maçaranduba e sapucaia, os resultados não mostraram essa tendência, somente a timborana seguiu esse comportamento.

No caso das duas espécies que praticamente não apresentaram variação no rendimento, pressupõe-se que o teor de umidade tenha sido um fator que influenciou nos resultados obtidos, ou seja, as madeiras foram carbonizadas sem estarem com o teor de umidade homogêneo.

No ciclo de carbonização de dez dias, possivelmente, os resíduos encontravam-se com um maior grau de umidade, necessitando-se de um maior tempo para secagem da madeira e, conseqüentemente, retardando as reações pirolíticas. Essa argumentação está exatamente em consonância com a afirmação de Beaumont (1981), de que a umidade promove um atraso na pirólise, devido à necessidade da madeira ser inicialmente aquecida até a completa evaporação da água contida no interior, para finalmente ocorrerem as reações pirolíticas.

No que se refere à espécie timborana, os carvões produzidos nos dois tempos de carbonização podem ter sido oriundos de resíduos contendo um teor de umidade semelhante ou muito próximo entre si. Assim, a madeira submetida a um maior tempo de carbonização sofreu um maior grau de volatilização, confirmando, a tendência de menor fração de carvão no final do processo.

Tabela 12. Porcentagem média de rendimento gravimétrico em carvão de três espécies madeiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Tempo de carbonização	
	7 dias	10 dias
Maçaranduba	25,37	25,68
Sapucaia	21,47	21,59
Timborana	29,55	25,70

O rendimento gravimétrico do carvão apresentou diferença altamente significativa entre as espécies estudadas e não significativa para o tempo de carbonização (Tabela 13), sendo uma característica de fundamental importância para o conhecimento do percentual de madeira enfiada que é transformado em carvão.

Tabela 13. Análise de variância do rendimento gravimétrico em carvão (%) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	5	229,1622	45,83244	3,58
Espécie	2	191,6539	95,82695	7,48**
Tempo	1	9,838301	9,838301	0,77 ^{ns}
Espécie x Tempo	2	27,67003	13,83502	1,08
Resíduo	24			

FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; F: Razão da variância; **: Altamente significativo; ^{ns}: Não significativo.

A comparação de médias de rendimento em carvão (Tabela 14) indica que os carvões de maçaranduba e timborana estatisticamente não possuem diferença significativa, enquanto que o de sapucaia é diferente dos demais.

Tabela 14. Comparação de médias do rendimento gravimétrico em carvão (%) pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeireiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Média (%)
Maçaranduba	25,5240a
Sapucaia	21,5312b
Timborana	27,6253a

Médias seguidas da mesma letra não apresentam diferença entre si.

4.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DO CARVÃO VEGETAL

4.3.1. Densidade a granel

As médias de densidade a granel do carvão encontram-se na Tabela 15. Constata-se que os carvões de maçaranduba e sapucaia apresentaram-se bem mais pesados do que o de timborana, validando a lógica de que madeira pesada, normalmente, gera carvão pesado. Isso está de acordo com os resultados de Mendes et al. (1982), os quais mostram que quanto maior a densidade da madeira maior é o peso do carvão.

No que se refere a tempo de carbonização, observou-se que essa variável da conversão pirolítica age muito pouco sobre a densidade a granel que expressa a relação entre o peso do carvão contido em um recipiente de 1 m³ de volume. Essa propriedade está mais relacionada com a granulometria, ou seja, maior ou menor quantidade de massa por unidade de volume ou da existência de vazios entre os pedaços de carvão contidos no recipiente.

Tabela 15. Densidade a granel média do carvão (kg/m^3) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Tempo de carbonização	
	7 dias	10 dias
Maçaranduba	231,14	231,14
Sapucaia	210,02	195,50
Timborana	176,45	180,58

A análise de variância indica que o fator espécie é altamente significativo sobre a densidade a granel. No que concerne a tempo de carbonização, constatou-se que para a maçaranduba esse fator não causou qualquer efeito sobre a densidade a granel, enquanto que para a sapucaia teve um efeito negativo, causando uma diminuição de aproximadamente 6,91%, enquanto que para a timborana o efeito foi positivo, havendo um acréscimo de 2,34%. Apesar dessas variações, comprovou-se que as diferenças observadas não são estatisticamente significativas (Tabela 16).

Tabela 16. Análise de variância da densidade a granel do carvão (kg/m^3) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	5	0,2995172	0,599034 ⁻¹	7,23 ^{**}
Espécie	2	0,2571270	0,1285635	15,51 ^{**}
Tempo	1	0,1793628 ⁻¹	0,1793628 ⁻¹	2,16 ^{ns}
Espécie x Tempo	2	0,2445385 ⁻¹	0,1222692 ⁻¹	1,48 ^{ns}
Resíduo	24	0,1988767	0,8286530 ⁻²	

FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; F: Razão da variância; **: Altamente significativo; ns: Não significativo.

A comparação das médias de densidade a granel sob o efeito do fator espécie indicou diferença altamente significativa entre as três médias através do teste SNK ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 17).

Tabela 17. Comparação de médias de densidade a granel do carvão (kg/m^3) pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeireiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Média / Comparações (kg/m^3)
Maçaranduba	231,14a
Sapucaia	202,76b
Timborana	178,51c

Letras diferentes seguindo as médias indicam diferença entre os valores.

4.3.2. Densidade aparente do carvão

As medias de densidade aparente do carvão produzido podem ser observadas na Tabela 18. Constata-se que carvões de maçaranduba e sapucaia são mais pesados que o de timborana, vindo assim confirmar que madeira densa gera carvão também denso. Essa tendência também foi observada por Numazawa (1986), o qual estudou resíduos de três espécies de densidade diferente da região de Curuá-Una/Pará, por Mendes et al. (1982) que estudaram carvão de vários eucaliptos e por Pastore et al. (1989) que estudaram vinte espécies da região amazônica.

Tabela 18. Densidade aparente média do carvão (g/cm^3) de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Tempo de carbonização	
	7 dias	10 dias
Maçaranduba	0,55	0,52
Sapucaia	0,56	0,49
Timborana	0,38	0,39

No que concerne a tempo de carbonização, constatou-se que somente a espécie sapucaia sofreu o efeito desse fator, apresentando densidade de $0,56 \text{ g/cm}^3$ para carvão obtido em sete dias de carbonização e $0,49 \text{ g/cm}^3$ em de dez dias.

Os valores de densidade aparente de carvão obtidos neste estudo são muito próximos dos carvões de madeiras tropicais com densidades equivalentes encontrados em

várias pesquisas como por exemplo, em NUMAZAWA (1986); PASTORE et al., (1989) e NUMAZAWA (2003).

A análise de densidade aparente do carvão mostrou ter ocorrido diferença significativa entre as espécies (Tabela 19). No entanto, não foi observada diferença em relação ao tempo de carbonização.

Tabela 19. Análise de variância da densidade aparente do carvão (g/cm^3) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	5	0,1455727	0,2911455 ⁻¹	21,69 ^{**}
Espécie	2	0,1312157	0,6560787 ⁻¹	48,88 ^{**}
Tempo	1	0,7257995 ⁻²	0,7257995 ⁻²	5,41 ^{**}
Espécie x Tempo	2	0,7099005 ⁻²	0,3549503 ⁻²	2,64 ^{ns}
Resíduo	24	0,3221058 ⁻¹	0,1342107 ⁻²	

FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; F: Razão da variância; ^{**}: Altamente significativo; ^{ns}: Não significativo.

O teste de comparação de médias realizado através do método de SNK, ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 20), indica que as espécies maçaranduba e sapucaia apresentaram densidade aparente do carvão diferente de timborana. Este resultado apresentou relação direta com a densidade da madeira, pois timborana apresentou densidade bastante inferior em relação às espécies maçaranduba e sapucaia. Esta tendência já foi observada em outros estudos como, por exemplo, em NUMAZAWA (1986); PASTORE et al. (1989) e AQUINO (2003).

Tabela 20. Comparação de médias de densidade aparente do carvão (g/cm^3) pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Média / Comparações (g/cm^3)
Maçaranduba	0,53 a
Sapucaia	0,52 a
Timborana	0,38 b

Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si.

A relação direta existente entre os valores de densidade da madeira e densidade do carvão, conforme se observa nesse estudo, intensifica a importância da separação de resíduos por espécies, assim como a sua escolha para produção de carvão. Esse procedimento permite prever as características do carvão, mediante a avaliação da densidade de sua madeira, proporcionando que a empresa direcione sua produção conforme a necessidade do consumidor, e realize pesquisas no intuito de melhorar as características do carvão.

4.3.3. Poder calorífico superior do carvão

Conforme a Tabela 21, observa-se que o poder calorífico do carvão varia diferentemente entre as espécies estudadas. Para maçaranduba e timborana, o tempo de carbonização causou um decréscimo no poder calorífico da ordem de 12,63% e 5, 11%, respectivamente, enquanto para sapucaia houve um aumento de 4,48%. Isto demonstra que o efeito foi mais importante para maçaranduba.

Segundo Oliveira et al. (1982a), Satonaka (1982), Petroff e Doat (1978) e Earl (1974), o poder calorífico pode variar de acordo com a composição química do carvão (teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas). Os resultados obtidos nesse trabalho vêm confirmar esta argumentação, ou seja, em face à diferente composição química (ver item 4.4), os carvões apresentaram diferentes valores de poder calorífico.

Globalmente, os valores de poder calorífico do carvão de resíduos industriais são menores do que aqueles encontrados por Aquino (2003), de 28751 a 32047 kj/kg, e por Numazawa (1986), de 29819 a 34891 kj/kg.

Tabela 21. Média do poder calorífico superior de carvão (kj/kg) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Tempo de carbonização	
	7dias	10 dias
Maçaranduba	26841	23451
Sapucaia	27539	28830
Timborana	27444	26041

A análise de variância para o poder calorífico superior do carvão não mostrou diferença significativa em função da espécie e do tempo de carbonização (Tabela 22).

Os resultados obtidos não condizem com o esperado, pois maçaranduba e timborana tiveram maior poder calorífico na carbonização de 7 dias e o esperado era que isso acontecesse no maior tempo. Existem duas possibilidades que poderiam explicar este resultado: a primeira seria um maior teor de umidade dos resíduos utilizados na carbonização de 10 dias, proporcionando assim o menor grau de volatilização; a segunda seria a execução do travamento (abafamento) do forno ter ocorrido muito cedo, fazendo com que a temperatura interna se mantivesse baixa, causando, portanto, uma menor volatilização.

Tabela 22. Análise de variância do poder calorífico superior do carvão (kJ/kg) de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	5	0,1441540	0,2883080 ⁻¹	2,39 ^{ns}
Espécie	2	0,7886628 ⁻¹	0,3943314 ⁻¹	3,28 ^{ns}
Tempo	1	0,2103805 ⁻¹	0,2103805 ⁻¹	1,75 ^{ns}
Espécie x Tempo	2	0,4424965 ⁻¹	0,2212482 ⁻¹	1,84 ^{ns}
Resíduo	24	0,2889349	0,1203895 ⁻¹	

FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; F: Razão da variância; ^{ns}: Não significativo.

4.4. PROPRIEDADES QUÍMICAS

4.4.1. Materiais voláteis

Na Tabela 23, encontram-se os valores médios de materiais voláteis contidos no carvão. Constata-se que a maçaranduba e a timborana sofreram menor grau de volatilização para carbonização em 10 dias. Esse resultado não era esperado, uma vez que,

quanto maior a exposição da madeira ao calor maior é o grau de volatilização. De forma que, esse resultado pode ter sido consequência do maior teor de umidade inicial da madeira carbonizada em 10 dias. Isto provocou um tempo maior de secagem da madeira, portanto, um menor tempo efetivo de carbonização, provocando um menor grau de volatilização e, finalmente, resultando em maior quantidade de voláteis contidos no interior do carvão. Essa argumentação vem concordar com Oliveira e Almeida (1980) e Wenzl (1970), quando mostram que quanto maior o tempo de carbonização (menor taxa de aquecimento) maior é o grau de volatilização respectivamente. O carvão de sapucaia apresentou uma tendência lógica, vinda, assim, concordar com os autores anteriormente citados. Esses valores encontrados estão muito próximos dos resultados encontrados por Numazawa (1986) que carbonizou resíduos de exploração florestal a 400 °C.

Tabela 23. Porcentagem média dos materiais voláteis do carvão de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Tempo de carbonização	
	7dias	10 dias
Maçaranduba	24,71	27,93
Sapucaia	26,00	23,94
Timborana	24,44	31,47

A análise de variância dos materiais voláteis indica diferença significativa em relação à espécie e altamente significativa em relação ao tempo e interação (Tabela 24).

Tabela 24. Análise de variância do teor de materiais voláteis contidos no carvão (%) de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	5	204,5851	40,91701	6,97**
Espécie	2	44,56718	22,28359	3,79*
Tempo	1	55,84216	55,84216	9,51**
Espécie x Tempo	2	104,1757	52,08786	8,87**
Resíduo	24	140,9346	5,872273	

FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; F: Razão da variância; **: Altamente significativo; *: Significativo.

Analisando a influência do tempo sobre as espécies, observou-se que a timborana e a maçaranduba diferiram após 7 e 10 dias de carbonização, enquanto que sapucaia, tanto nos 7 como nos 10 dias, não apresentou diferença na porcentagem de materiais voláteis (Tabela 25). Em relação à sapucaia, o teor de materiais voláteis no carvão após 7 e 10 dias é coerente com aquelas observadas em laboratório, onde todos os procedimentos são controlados, ou seja, quanto maior for o tempo de carbonização menor será quantidade de materiais voláteis contidos no carvão.

Nas condições reais de fabricação de carvão em forno "Rabo Quente" é muito difícil de se conduzir uma carbonização com temperatura homogênea no interior do forno, o que provoca, conseqüentemente, a desigualdade nas características do carvão.

Tabela 25. Comparação de médias do teor de materiais voláteis contidos no carvão (%) pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeireira carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécies	Tempo de carbonização	
	7 dias	10 dias
Maçaranduba	24,71b	27,93a
Sapucaia	26,00a	23,94a
Timborana	24,44b	31,47a

Médias seguidas da mesma letra não apresentam diferença entre si

4.4.2. Teor de cinzas

As médias do teor de cinzas encontram-se na Tabela 26. Verifica-se que os valores mostrados estão dentro do limite dos carvões de madeiras tropicais encontrados por outros pesquisadores tais como Aquino (2003) e Numazawa (1986), que encontraram valores variando de 0,43 a 1,76%, exceto para o carvão de sapucaia produzido em 10 dias de carbonização que foi de 2,5%.

Tabela 26. Porcentagem média de cinza de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Tempo de carbonização	
	7 dias	10 dias
Maçaranduba	0,8	0,7
Sapucaia	1,3	2,5
Timborana	1,5	1,4

Observou-se que os fatores espécie, tempo de carbonização e as interações causaram diferenças altamente significativas no teor de cinzas (Tabela 27). Acredita-se que este resultado pode ser intrínseco à espécie, pois conforme Collet (1956), o teor de cinzas após carbonização depende da quantidade de compostos inorgânicos presentes na madeira. Se isto condisser com a realidade sapucaia e timborana não podem ser consideradas adequadas para carvão utilizado na siderurgia.

Tabela. 27. Análise de variância do teor de cinzas contidos no carvão (%) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	5	10,04567	2,009133	30,75**
Espécie	2	6,716667	3,358333	51,40**
Tempo	1	0,6750000	0,6750000	10,33**
Espécie x Tempo	2	2,654000	1,327000	20,31**
Resíduo	24	1,568000	0,6533333 ⁻¹	

FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; F: Razão da variância; **: Altamente significativo; ^{ns}: Não significativo.

Nos 7 dias de carbonização, maçaranduba apresentou diferença entre sapucaia e timborana, que por sua vez não diferiram entre si. Após 10 dias de carbonização todas as espécies tiveram comportamento diferenciado, com sapucaia apresentando o maior teor de cinzas (Tabela 28).

Tabela 28. Comparação de médias do teor de cinzas contidos no carvão (%), pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécies	Tempo de carbonização	
	7 dias	10 dias
Maçaranduba	0,8b	0,7c
Sapucaia	1,3a	2,5a
Timborana	1,5a	1,4b

Médias seguidas da mesma letra não apresentam diferença entre si

4.4.3. Teor de carbono fixo

As médias de teor de carbono fixo estão demonstradas na Tabela 29. Observa-se que, exceto para a espécie sapucaia que apresentou maior teor de carbono fixo para carvão produzido em 10 dias, os demais não tiveram esta tendência. Esse comportamento já tinha sido verificado com teor de materiais voláteis que apresentou tendência contrária ao de teor de carbono fixo. Os valores encontrados são comparáveis com os de Numazawa (1986) para carbonização a 400 °C com madeira de *Manilkara huberi* (Ducke) Standl (maçaranduba), *Goupia glabra*, Aubl. (cupiúba) e *Dinizia excelsa*, Ducke (angelim-pedra) que variou de 68,17 a 70,67% e Aquino (2003) com madeira de *Manilkara huberi* (Ducke) Standl (maçaranduba), *Hymenolobium* sp (angelim) e *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) que variou de 67,15 a 75,24%. Esses dois autores trabalharam em escala laboratorial.

Tabela 29. Porcentagem média de carbono fixo de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Tempo de carbonização	
	7dias	10 dias
Maçaranduba	74,49	71,35
Sapucaia	72,66	73,58
Timborana	74,02	68,29

A análise de variância indicou que o fator espécie não causou uma variação que estatisticamente seja significativa sobre o teor de carbono fixo. No entanto, causou diferença altamente significativa com o tempo de carbonização e com a interação (Tabela 30).

Tabela 30. Análise de variância do teor de carbono fixo contidos no carvão (%) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	5	184,8274	36,96548	6,27**
Espécie	2	39,78915	19,89457	3,37 ^{ns}
Tempo	1	68,94768	68,94768	11,69**
Espécie x Tempo	2	76,09056	38,04528	6,45**
Resíduo	24	141,5416	5,897565	

FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; F: Razão da variância; **: Altamente significativo; ^{ns}: Não significativo.

Observou-se que timborana, após 10 dias de carbonização apresentou comportamento bastante diferenciado das demais espécies aos 7 e 10 dias. Talvez, a mais baixa densidade desta madeira pode ter conduzido a este resultado.

Tabela 31. Comparação de médias do teor de carbono fixo contido no carvão (%), pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécies	Tempo de carbonização	
	7 dias	10 dias
Maçaranduba	74,49a	71,35a
Sapucaia	72,66a	73,58a
Timborana	74,02a	68,29b

Médias seguidas da mesma letra não apresentam diferença entre si

4.5. PROPRIEDADE MECÂNICA (FRIABILIDADE)

A friabilidade não apresentou uma tendência para que fosse possível inferir sobre um padrão. A maçaranduba que apresenta densidade da madeira semelhante à sapucaia, aumentou a produção de finos com o tempo de carbonização, enquanto a sapucaia reduziu.

Timborana apresentou a mesma tendência da maçaranduba, porém uma friabilidade bastante inferior, o que certamente é uma característica intrínseca da espécie (Tabela 32).

Tabela 32. Porcentagem média da friabilidade de três espécies madeireiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Tempo de carbonização	
	7 dias	10 dias
Maçaranduba	26,6	32,6
Sapucaia	30,2	27,6
Timborana	12,0	14,67

Segundo a classificação de CTFT (Centre Technique Forestier Tropical), o carvão de timborana é pouco a medianamente friável nas duas condições de carbonização (7 e 10 dias) e os demais de bastante a muito friável (Tabela 33)

Tabela 33. Caracterização do carvão quanto a friabilidade.

Classificação do carvão	Perda em forma de partículas
Muito friável	Superior a 30%
Bastante friável	25 a 29 %
Medianamente friável	15 a 24%
Pouco friável	10 a 14%
Muito pouco friável	Inferior a 10%

Fonte CTFT (Centre Technique Forestier Tropical)

A friabilidade apresentou diferença significativa somente para espécies e não significativa para tempo e interação (tempo x espécie), conforme pode-se observar na Tabela 34.

Tabela 34. Análise de variância da friabilidade do carvão (%) de três espécies madeiras carbonizadas em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	5	4,205511	0,8411021	30,13**
Espécie	2	3,952471	1,976235	70,78**
Tempo	1	0,7803058 ⁻¹	0,7803058 ⁻¹	2,79 ^{ns}
Espécie x Tempo	2	0,1750092	0,8750460 ⁻¹	3,13 ^{ns}
Resíduo	24	0,6700620	0,2791925 ⁻¹	

FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; F: Razão da variância ** : Altamente significativo; ^{ns}: Não significativo.

Analisando isoladamente a espécie do tempo de carbonização, é possível observar na Tabela 35 que, realmente, foi timborana a responsável pela diferença significativa das espécies estudadas.

Tabela 35. Comparação de médias da friabilidade do carvão (%) pelo teste Student Newman Keuls (5%), de três espécies madeiras carbonizadas, em 7 e 10 dias. Cikel Brasil Verde/ Universidade Federal Rural da Amazônia.

Espécie	Média / Comparações (%)
Maçaranduba	30 a
Sapucaia	29 a
Timborana	13 b

Médias seguidas da mesma letra não apresentam diferença entre si

Não se pode deixar de mencionar o fato de que existe diferença nos resultados provenientes do carvão produzido em laboratório (fatores controlados) em relação àquele produzido nas carvoarias, onde não é possível controlar algumas variáveis. Esse fato, dificultou comparações com outros trabalhos, mas serviu para alertar que comparações devem ser feitas com restrições.

Num contexto geral, a partir dos resultados descritos isoladamente, foi possível fazer algumas constatações gerais, referentes às espécies, propriedades e tempo de carbonização, das quais foram obtidas as conclusões.

sapucaia e timborana, pois dos 23348 m³/ano, que são explorados da maçaranduba, aproximadamente, 11674 m³/ano referem-se ao resíduo utilizado para a produção de carvão. A sapucaia e a timborana apresentaram bem menor potencialidade, considerando que a empresa disponibiliza em média de 668,5 e 516,5 m³/ano de resíduo, respectivamente.

5. CONCLUSÕES

- a) A timborana foi à espécie que respondeu com maior rendimento gravimétrico de carvão em função do tempo de carbonização.
- b) A madeira de densidade elevada como a maçaranduba e sapucaia, garante a produção de carvão denso.
- c) A maçaranduba e a sapucaia são as espécies que tem maior potencial energético com maior quantidade de energia por unidade de massa.
- d) As características químicas do carvão de maçaranduba e timborana não seguiram uma tendência lógica em função do tempo de carbonização.
- e) Para as condições e época que foi desenvolvido o trabalho, a carbonização em sete dias proporciona a obtenção de carvão de melhor qualidade.
- f) Entre as espécies estudadas, a timborana é a mais qualificada para transporte à longa distância devido a baixa friabilidade do carvão.
- g) A espécie foi o fator que mais influenciou nas características do carvão. O tempo de carbonização causou influencia sobretudo nas características químicas do carvão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M.R. Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria. In: CETEC. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo horizonte. p.175-180 (SPT-008). 1982.
- ALMEIDA, M.R.; RESENDE, M.E.A. O processo de carbonização contínua da madeira. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo horizonte. p.141-156 (SPT-008). 1982.
- AQUINO, J.N. 2003. **Caracterização do carvão de resíduos de processamento primário da madeira e sua potencialidade energética**. Universidade Rural da Amazônia Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Belém. 2003. 81p. (Dissertação de Mestrado- Universidade Federal Rural da Amazônia.
- BABOSA, A.P.; VIANEZ, B.F.; VAREJÃO, M. DE J.; ABREU, R.L.S. de **Considerações sobre o perfil tecnológico do setor madeireiro na Amazônia Central**. 2001
- BAYLEYS, R.T.; BLANKENHORN, P.R. Calorific and porosity developement in carbonized wood. **Wood Science**. 15(1): 19-28. 1982.
- BLANKENHORN, P.R.; BARNES, D.P.; KLINE, D.E.; MURPHEY, W.K. Porosity and pore size distribution of black cherry carbonized in na inert atmosphere. **Wood Science**. 11(1): 23-29. 1978.
- BEAL, F.C.; EICKNER, H.W. **Thermal degradation of wood components**; a review of the literature. S.1., Forest Products Laboratory, Forest Service, US Departament of Agriculture. 22p. s.d.
- BEAUMONT, O. Pyrolyse extractive du bois. Thèse de Docteur-Ingénieur, ENSM, novembre 1981. 160 p.
- BENZO, G.; LUENGO, C.A. Biomassa coo potencial energético adicional aos combustíveis fósseis.. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 3, São Paulo. **Anais**. p.133-137. 1998.

- BRITO, J.O.; BARICHELLO, L.E. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. IPEF, Piracicaba, (14):1-25. 1981.
- CARRÉ, J.; LACROSSE, L.; SCHENKEL, Y. **Relation Between Biomass Characteristics and Energy Systems**, 7e Conférence Feisap, Manila. 1992.
- COLLET, F. Estudos comparativos, em escala laboratoriais de diversas madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal. São Paulo. **ABM**. 12 (42): 5-14. 1956.
- COUTINHO, A.R.; FERRAZ, E.S.B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperaturas de carbonização. IPEF, Piracicaba, (38): 33-50. 1988.
- COUTO, L.; FONSECA, E.M.B.; MULLER, M.D. **O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais: Aspectos Técnicos, Econômicos Sociais e Ambientais**. Belo Horizonte-MG. 2000. 44p.
- DOAT, J.;PETROFF, G. La carbozination des bois tropicaux. **Revue Bois et des Tropiques**. Nojent sur Marne/France. Centre Technique Forestier Tropical - CTFT 159:55-72. 1975.
- EARL, D.E. **Charcoal**. André Mayer Research Fellow. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 97p. 1974.
- FONTES, P. J.P. **Produção de carvão vegetal com oito espécies florestais da região amazônica em forno metálico**. Brasília. IBAMA/DIRPED/LPF. 21p. 1989. (Série Técnica nº10).
- FONTES, P. J.P.; QUIRINO, W. F.; PASTORE, J. F. 2003. Aglutinantes para Briquetagem de carvão vegetal. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/lpf.pdf>>, acessado em 22 de novembro de 2003.
- GERWING, J.; VIDAL, E.; VERÍSSIMO, A. **Rendimento no Processamento de Madeiras no Estado do Pará**. Série Amazônica nº 18-Belém: IMAZON. 2000. 32p.

GOMES, P.A.; OLIVEIRA, J.B. Teoria de carbonização da madeira. In: CETEC. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte. p.27-41 (SPT-001). 1980.

HARRIS, A.C. Charcoal production. **Eighth World Forestry Congress**. Fakarta.p.16-28. 1978

HARRIS, J.M. The heritability of wood density. INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATION. MEETING SECTION 41, Melbourne. Proceedings. Melbourne, IUFRO. v.2. 1965. 14p.

IBGE – Diretoria de Geociencias, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro. 1992. 92p.

IBDF. Madeiras da Amazônia – características e utilização. Estação experimental de Curuá- una. vol. II. Brasília, IBDF/LPF. 1988. 236p.

KARCCHESY, J.; KOCH, P. **Energy production from hardwood growing on southern pines sites**. U.S. Department Report SO-24. Southern forest Experiment Station. New Orleans. 1979.

KOROBKIN, V.A. **Optimum temperature of carbonization of wood**. Stal Maskva 8, 1948 (487-494) (RUN) Chemical Abstract. 44 (3). 1950.

KRILA, J.M. Characteristics of carbonized wood affected by extration. **Wood Science**. 13(1): 18-25. 1980.

LAMAXANA, N.B. **Proximate chemical analyses of charcaol from some philippines woods**. Forpride Digest. 7(213): 48-53. s.d.

MARTINS.H. Madeira como fonte de energia. In: CETEC. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte. p. 9-26 (SPT-001). 1980.

MENDES, M.G.; GOMES, P.A.; ALMEIDA, M.R. Propriedades do carvão vegetal. In: CETEC. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte. p.75-89 (SPT-008). 1982.

NANASSY, A.J.; FUNG. D.P.C. Pyrolyses of wood studied by E.S.R. **Wood Science**. 7(3): 232-239. 1975.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2.ed. 2003. 199p.

NUMAZAWA, S. **Carbonização da madeira, abrangendo seus aspectos físicos, químicos, mecânicos e tecnológicos**. Universidade Federal do Paraná, curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. 1983. 57p. (não publicado)

NUMAZAWA, S. **Aproveitamento de resíduos de exploração florestal em Curua-Una/Pa, para produção de carvão vegetal**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Curitiba. 126 p. 1986.

NUMAZAWA, S. Análise da microestrutura e caracterização do carvão produzido a diferentes pressões. **Revista de Ciências Agrárias**. Belém, nº39, p.13-23, jan/jun. 2003.

OLIVEIRA. J.B.; ALMEIDA, M.R. Avaliação de carvão vegetal. In: CETEC. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte. p.43-53. 1980. (SPT-001).

OLIVEIRA. J.B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M.G.; GOMES, P.A. **Produção de carvão vegetal – aspectos técnicos**. In: CETEC. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte. p.59-72. 1982a. (SPT-008)

OLIVEIRA. J.B.; GOMES, P.A.; ALMEIDA, M.R. Propriedades do carvão vegetal. In: CETEC. **Carvão vegetal**. Belo Horizonte. p.39-62. 1982b. (SPT-006).

OLIVEIRA. E.; VITAL. R.B.; VALENTE. F.; GOMIDE. L.J. Efeito da qualidade da madeira sobre o rendimento e qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**. 13(1): 85-97. 1989.

PASTORE. M.C.T.; OKINO. A.Y.E.; PASTORE. Jr. F. **Carbonização de Madeiras da Amazônia Parte 1: Floresta Nacional do Tapajós**. Brasília. IBAMA/DIRPED/LPF. 1989. 12p.(Série Técnica nº12).

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Processamento e Comercialização de Madeira e Produtos da Madeira: Comercialização de Produtos Madeireiros da Amazônia**. Brasília/DF. 2000.

- PETROFF, G.; DOAT, J. Pirolyse des bois tropicaux – Influence de la composition chimique de bois sur les produits de distillation. **Revue Bois et des Tropiques**. Nojent sur Marne/France. Centre Technique Forestier Tropical – CTFT. 177:51-64. 1978.
- SATONAKA, S. Carbonization and Gaseification of Wood. Energy from forest biomass. Ed. By W. Ramsay Smith Colleg of Forests resources. University of Washington, scattle. Washington. **XVII-IUFRO World Congress Energy Group Proceeding**. Academic Press. P.147-154. 1982.
- SOUZA, M.H.; MAGLIANO, M.M.; CAMARGO, J.A.A. **Madeiras tropicais brasileiras**. Brasília. IBAMA/LPF. 152p. 1997.
- UHART, E. **A floresta amazônica: fonte de energia**. Belém: SUDAM. 114p. 1976.
- VALE, A.T.; MOURA, V.P.G.; MARTINS, I.S.; PEREIRA, F.S. Influência da gamose e .da procedência de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maidem no rendimento da carbonização e na qualidade do carvão vegetal. **Revista Árvore**, v.21, n.2, p.253-258. 1997.
- VEADO, J.T.; ABDALA, E.; FERNANDEZ, M. DE P.; KLINGL, O. **Tecnologia avançada para produção de carvão vegetal**. Metalúrgica. ABM. 33(239): 596-603. 1977.
- VIDAL, E.; GERWING, J.; BARRETO, P.; AMARAL, P.; JOHNS, J. **Redução de desperdícios na produção de madeira na Amazônia**. IMAZOM: Instituto do Homem e do Meio Ambiente da Amazônia. Série Amazônica. Nº5. Belém. 1997. 18p.
- VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINE, M. **Pólos Madeireiros do Estado do Pará**. Belém: IMAZON. 2002. 72p.
- WATRIN, O dos S.; ROCHA, A. M. A. **Levantamento da vegetação natural e do uso da terra no município de Paragominas, PA utilizando imagens TM/ LANDSAT**. Belém: Embrapa - CPATU, 1992. 40p. (Embrapa - CPATU. Boletim de Pesquisa, 124).
- WENZL, H.F.J. **The chemical technology of wood**. New York. Academic Press. 1970. 692p.

