

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**

**CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL DE RESÍDUOS DE
PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DA MADEIRA DE *Hymenolobium* sp, *Manilkara
amazonica* (Huc.) Standl E *Hymenaea courbaril* L. E SUA POTENCIALIDADE
ENERGÉTICA NO ESTADO DO PARÁ**

JULIVANE NAZÁRIO DE AQUINO

BELEM

2003

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL DE RESÍDUOS DE
PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DA MADEIRA DE *Hymenolobium* sp, *Manilkara*
amazonica (Huc.) Standl E *Hymenaea courbaril* L. E SUA POTENCIALIDADE
ENERGÉTICA NO ESTADO DO PARÁ

JULIVANE NAZÁRIO DE AQUINO

Engenheira Florestal

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural
da Amazônia, como parte das exigências do curso de
pós-graduação em Ciências Florestais, área de
concentração: Manejo Florestal e Silvicultura Tropical,
para obtenção do título de Mestra.

Orientador: Prof. Dr. Sueo Numazawa

BELÉM

2003

AQUIN 657 AQUINO, Julivane Nazário de.

Caracterização do carvão vegetal de resíduos de processamento primário da madeira de *Hymenolobium sp.*, *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl e *Hymenaea courbaril* L. e sua potencialidade energética no Estado do Pará./ Julivane Nazário de Aquino. – Belém, 2003.

83f. il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2003.

1. Carvão Vegetal – Pará. 2. Madeira. 3. Carbonização.
I. Título.

CDD 662.74098115

JULIVANE NAZÁRIO DE AQUINO

**CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL DE RESÍDUOS DE
PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DA MADEIRA DE *Hymenolobium* sp, *Manilkara
amazonica* (Huc.) Standl E *Hymenaea courbaril* L. E SUA POTENCIALIDADE
ENERGÉTICA NO ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural
da Amazônia, como parte das exigências do curso de
pós-graduação em Ciências Florestais, área de
concentração: Manejo Florestal e Silvicultura
Tropical, para obtenção do título de Mestra.

Aprovada em 17/03/2003

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Sueo Numazawa
Orientador
Universidade Federal Rural da Amazônia

Dr. Dimas Agostinho da Silva
1º Examinador
Universidade Federal do Paraná

Dr. Osmar José Romeiro de Aguiar
2º Examinador
Embrapa – Amazônia Oriental

Dr. João Olegário Pereira de Carvalho
3º Examinador
Embrapa – Amazônia Oriental

A Deus,

aos meus pais, Maria Aquino e Milton Aquino,

ao meu irmão Milton Júnior

e ao meu sobrinho Wagner Sarmento.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por ter me concedido esta oportunidade de avanço, possibilitando o meu aprimoramento profissional.

Aos meus Pais pelos ensinamentos valiosos da vida, amor sem medida, compreensão, amizade verdadeira e grandes incentivos durante toda minha trajetória neste mundo.

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

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

Ao Professor Dr. Sueo Numazawa, pela orientação dedicada, estímulo e compreensão.

A todos do LPF – Laboratório de Produtos Florestais da UFRA, pelo apoio concedido durante a realização desta pesquisa, em especial ao técnico de apoio Sr. Varlindo.

A todos do DSG – Departamento de Serviços Gerais da UFRA, pela assistência técnica prestada durante a realização da pesquisa em laboratório, em especial ao eletricista Sr. Valdeci.

A todos do Laboratório de Entomologia da UFRA, pela permissão e apoio no uso de equipamentos pertencentes ao citado laboratório, durante a pesquisa, em especial as agrônomas Thânia e Wilma.

A todos do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental pela identificação das espécies estudadas nesta pesquisa.

A todos do Departamento de Zootecnia por terem permitido a utilização de equipamentos imprescindível nesta pesquisa.

Ao Engº Ftal. João Ricardo pela ajuda no processamento estatístico dos dados desta pesquisa.

A todos os meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e consideração, em especial a Engº Ftal. Gracialda.

E a todos que de forma direta ou indiretamente contribuíram na elaboração desta dissertação,
MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS.

SUMÁRIO

	p.
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	12
CAPITULO 1. INTRODUÇÃO GERAL.....	13
1.1. RESUMO GERAL.....	13
1.2. APRESENTAÇÃO.....	14
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	14
CAPITULO 2. CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL E RENDIMENTO DOS PRODUTOS DE PIROLISE DAS MADEIRAS DE <i>Hymenolobium</i> sp., <i>Manilkara amazonica</i> (Huc.) Standl E <i>Hymenaea courbaril</i> L.....	17
RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	18
2.1. INTRODUÇÃO.....	19
2.2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.2.1. Composição química da madeira.....	19
2.2.2. Definição de carbonização e/ou destilação seca da madeira.....	21
2.2.3. Evolução da carbonização da madeira.....	21
2.2.4. Produtos obtidos na carbonização da madeira.....	24
2.2.5. Fatores que influenciam nas propriedades do carvão vegetal.....	26
2.2.5.1. Temperatura de carbonização.....	26
2.2.5.1.1. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal.....	26
2.2.5.1.2. Densidade aparente do carvão vegetal.....	27
2.2.5.1.3. Composição química do carvão vegetal.....	28
2.2.5.1.4. Poder calorífico superior do carvão vegetal.....	29
2.2.5.1.5. Friabilidade do carvão vegetal.....	31
2.2.5.2. Tempo de carbonização.....	31
2.2.5.2.1. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal.....	31
2.2.5.2.2. Densidade aparente do carvão vegetal.....	32
2.2.5.2.3. Composição química do carvão vegetal.....	32
2.2.5.2.4. Poder calorífico superior do carvão vegetal.....	33
2.2.5.2.5. Friabilidade do carvão vegetal.....	33

2.2.6.	Efeito do teor de umidade da madeira na produção de carvão vegetal.....	34
2.3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
2.3.1.	Local de origem do material.....	35
2.3.2.	Seleção dos resíduos por espécie.....	35
2.3.3.	Coleta do material de estudo.....	35
2.3.4.	Determinação da densidade básica da madeira.....	35
2.3.5.	Carbonização da madeira.....	38
2.3.5.1.	Preparação do material para a carbonizaçã.....	38
2.3.5.2.	Produção de carvão vegetal.....	39
2.3.5.3.	Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (base seca).....	41
2.3.6.	Estudo das propriedades do carvão vegetal.....	41
2.3.6.1.	Propriedades físicas.....	41
2.3.6.1.1.	Densidade aparente do carvão vegetal.....	41
2.3.6.1.2.	Poder calorífico superior do carvão vegetal.....	42
2.3.6.2.	Propriedades químicas.....	43
2.3.6.2.1.	Análise química imediata do carvão vegetal.....	43
2.3.6.3.	Propriedade mecânica (friabilidade).....	44
2.3.7.	Análises estatísticas.....	45
2.4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
2.4.1.	Densidade básica da madeira.....	46
2.4.2.	Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (base seca).....	47
2.4.3.	Propriedades físicas.....	49
2.4.3.1.	Densidade aparente do carvão vegetal.....	49
2.4.3.2.	Poder calorífico superior do carvão vegetal.....	51
2.4.4.	Propriedades químicas (base seca).....	52
2.4.4.1.	Análise química imediata do carvão vegetal.....	52
2.4.5.	Propriedade mecânica (friabilidade do carvão vegetal).....	57
2.4.6.	Rendimento dos produtos de pirólise da madeira.....	58
2.5.	CONCLUSÕES.....	61
		62

CAPITULO 3. POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DA MADEIRA DE *Hymenolobium* sp., *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl E *Hymenaea courbaril* L.CONVERTÍVEL EM

CARVÃO VEGETAL	66
RESUMO	66
ABSTRACT	67
3.1. INTRODUÇÃO	68
3.2. REVISÃO DE LITERATURA	68
3.2.1. Biomassa vegetal e sua potencialidade energética	68
3.2.1.1. <i>Potencialidade energética da madeira</i>	68
3.2.1.2. <i>Florestas e sua potencialidade</i>	69
3.2.1.3. <i>Resíduos de madeira serrada e sua potencialidade</i>	70
3.2.2. Fatores que influenciam na potencialidade energética da madeira convertível em carvão vegetal	71
3.3. MATERIAL E MÉTODOS	71
3.3.1. Local de origem dos resíduos de madeira serrada	71
3.3.2. Seleção das espécies	72
3.3.3. Potencialidade energética dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal	72
3.3.4. Análise estatística	73
3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
3.4.1. Potencialidade energética dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal	73
3.4.2. Equivalência dos resíduos de madeira serrada em áreas de floresta natural e plantada	79
3.5. CONCLUSÕES	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

LISTA DE TABELAS

	p.
Tabela 1. Composição química elementar da madeira.....	20
Tabela 2. Componentes estruturais da madeira.....	20
Tabela 3. Evolução da carbonização da madeira.....	23
Tabela 4. Produtos obtidos na carbonização de 16 madeiras da Amazônia.....	24
Tabela 5. Produtos obtidos na carbonização de madeiras nativas da Amazônia e exóticas.....	25
Tabela 6. Rendimento dos produtos de carbonização de madeira.....	25
Tabela 7. Rendimento em carvão vegetal em diferentes temperaturas de carbonização.....	26
Tabela 8. Rendimentos gravimétricos médios de carvão vegetal em diferentes temperaturas de carbonização, em relação à madeira seca.....	27
Tabela 9. Influência da temperatura de carbonização sobre a densidade do carvão vegetal.....	27
Tabela 10. Variação da composição química elementar do carvão vegetal em diferentes temperaturas.....	28
Tabela 11. Análise química imediata do carvão vegetal de eucaliptos da Austrália em diferentes temperaturas de carbonização.....	29
Tabela 12. Poder calorífico superior do carvão vegetal com base na composição química elementar.....	30
Tabela 13. Rendimento percentual em finos de carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.....	31
Tabela 14. Friabilidade do carvão vegetal de <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill, produzido a 430°C.....	34
Tabela 15. Fatores e níveis especificados de estudo.....	46
Tabela 16. Média, amplitude de variação, desvio padrão e coeficiente de variação da densidade básica da madeira.....	47
Tabela 17. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização (base seca), em %.....	48

Tabela 18. Análise de variância de rendimento gravimétrico em carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	48
Tabela 19. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	49
Tabela 20. Densidade aparente do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização, em g/cm ³ .	50
Tabela 21. Análise de variância de densidade aparente do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em g/cm ³ .	50
Tabela 22. Densidade aparente do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em g/cm ³ .	51
Tabela 23. Poder calorífico superior do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização, em Kj/Kg.	52
Tabela 24. Análise de variância de poder calorífico superior do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em Kj/Kg.	52
Tabela 25. Análise química imediata do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização (base seca), em %.	54
Tabela 26. Análise de variância de teor de materiais voláteis do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	54
Tabela 27. Teor de materiais voláteis do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	55
Tabela 28. Análise de variância de teor de cinzas do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	55
Tabela 29. Teor de cinzas do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	56
Tabela 30. Análise de variância de teor de carbono fixo do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	56
Tabela 31. Teor de carbono fixo do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	56
Tabela 32. Friabilidade do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização, em %.	57
Tabela 33. Análise de variância de friabilidade do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	58
Tabela 34. Friabilidade do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.	58
Tabela 35. Rendimento dos produtos de pirólise de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização (base seca), em %.	59

Tabela 36. Análise de variância de rendimento de líquido pirolenhoso de resíduos de madeira serrada, em %.	60
Tabela 37. Rendimento de líquido pirolenhoso de resíduos de madeira serrada, em %.	60
Tabela 38. Análise de variância de rendimento de gás não-condensável de resíduos de madeira serrada, em %.	61
Tabela 39. Valores médios de Biomassa Seca (BS) de Floresta de Várzea (FV), Floresta de Terra Firme (FTF), Capoeira Enriquecida (CE), na Amazônia e de Floresta Plantada (FP) de <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex. Maiden com espaçamento de 1,5 x 1,0m.	70
Tabela 40. Potencialidade energética por unidade de massa de resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização, em Kj/Kg.	74
Tabela 41. Análise de variância de potencialidade energética por unidade de massa de resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, em Kj/Kg.	74
Tabela 42. Potencialidade energética por unidade de massa de resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, Kj/Kg.	75
Tabela 43. Estimativa da potencialidade energética anual (kjoule) dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, no Estado do Pará.	76
Tabela 44. Relação entre a potencialidade energética anual dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, quantidade de carvão vegetal e Tonelada Equivalente Petróleo por ano.	78
Tabela 45. Biomassa seca de resíduos de madeira serrada por espécie, em ton./ano e de diversos tipos de cobertura vegetal, em ton./ha.	79
Tabela 46. Equivalência dos resíduos de madeira serrada em área de diversos tipos de cobertura vegetal, em ha/ano.	80

LISTA DE FIGURAS

	p.
Figura 1. Saturação dos corpos de prova.....	37
Figura 2. Método de determinação do volume saturado dos corpos de prova.	38
Figura 3. Esquema do equipamento usado na carbonização da madeira.	39
Figura 4. Elevação da temperatura até o patamar final de carbonização.	40
Figura 5. Bomba calorimétrica utilizada para determinar o poder calorífico superior do carvão vegetal.	43
Figura 6. Tambor rotativo utilizado na realização do teste de tamboramento.	45

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1. RESUMO GERAL

Esta pesquisa foi desenvolvida em função das seguintes considerações: carência relevante de informações técnicas sobre a influência do fator tempo de permanência no patamar final de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de espécies da Amazônia; e mais de 50% da matéria-prima para produzir carvão vegetal, no Estado do Pará, provém de florestas naturais. Teve como objetivo, avaliar as características físicas, químicas e mecânica do carvão e o potencial energético do resíduo de madeira convertível em carvão das seguintes espécies: *Hymenolobium* sp (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), assim como, estimar a redução de área de floresta nativa explorada por ano no Estado do Pará para fins energéticos. As madeiras foram carbonizadas em forno elétrico durante os tempos de permanência no patamar final de carbonização de 2 e 4 horas à uma temperatura de 500°C com taxa de aquecimento de 6,7°C/min. O delineamento experimental utilizado foi o completamente ao acaso, em arranjos fatoriais de 3 x 2 com 3 repetições. Os dados obtidos foram analisados pelo Sistema de Análise Estatística (SAEG).

As propriedades do carvão vegetal estudadas foram: rendimento gravimétrico (%); densidade aparente (g/cm^3); poder calorífico superior (Kj/Kg); teores de carbono fixo(%); materiais voláteis (%); cinzas (%) e friabilidade (%). Além destas propriedades foram avaliados os rendimentos dos produtos derivados de pirólise da madeira (%), assim como a potencialidade energética das madeiras (KJ/Kg).

Os resultados mostram que o tempo de permanência no patamar final de carbonização exerce influencia altamente significativa em todas as propriedades do carvão vegetal, com exceção da densidade aparente e do teor de cinzas. Quando o tempo de permanência no patamar final de carbonização foi elevado por mais 2 horas, ocorreu um aumento no poder calorífico superior, no teor de carbono fixo e na friabilidade do carvão vegetal, e uma diminuição no rendimento gravimétrico e no teor de materiais voláteis, já no rendimento de líquido e gás não-condensável, o

efeito foi diferenciado. Todas as espécies estudadas são promissoras para obter alto rendimento gravimétrico em carvão vegetal com alta densidade.

Com relação à potencialidade energética dos resíduos de madeira convertível em carvão vegetal, para a espécie Angelim, constatou-se que o aumento no tempo de permanência no patamar final de carbonização, praticamente não causou efeito. No entanto, para Jatobá e Maçaranduba a variação foi importante, sendo que para a primeira espécie o efeito foi positivo com um aumento de 1.161Kj/Kg, enquanto que para a segunda foi negativo, tendo uma redução de 806Kj/Kg. A espécie de maior potencialidade energética convertível em carvão vegetal com base no volume de madeira comercializada no Estado do Pará e na potencialidade energética da madeira, para qualquer condição de carbonização, foi a Maçaranduba. A quantidade de resíduos de madeira serrada de Angelim, Maçaranduba e Jatobá gerada no Estado do Pará chega a equivaler a 15.075ha/ano em capoeira enriquecida e 7.065ha/ano de floresta plantada, devido à produção de biomassa seca por hectare ser menor nesses tipos de floresta.

1.2. APRESENTAÇÃO

O principal produto da floresta, ainda hoje é a madeira. Dentre os produtos derivados da madeira, o carvão vegetal ocupa uma posição de destaque na geração de energia, principalmente devido ao caráter renovável da matéria-prima. A crescente demanda de carvão vegetal como redutor de minérios em indústrias siderúrgicas, bem como em núcleos consumidores, tais como: residências, usinas, termoeletricas, indústrias químicas, etc.. força a procura de alternativa de madeiras disponíveis para serem usadas como matéria-prima.

A conversão integral de uma floresta tropical densa exclusivamente em carvão vegetal, não seria admissível, tendo em vista a ocorrência de madeiras de uso mais nobre. Seria justificado sim, o aproveitamento de fontes disponíveis como madeiras remanescentes de exploração florestal, de resíduos industriais de capoeiras, etc. (Numazawa, 1986).

Vidal et al. (1997), determinaram que a exploração madeireira desordenada desperdiça um grande volume de madeira, tanto na floresta como nas indústrias.

Nas serrarias, conforme as toras, tipos de madeira e tecnologia de corte, são aproveitados apenas 40 a 65% da tora, quase a metade resulta em produto secundário (Revista Brasil Madeira, 1980).

O Estado do Pará, de acordo com Veríssimo e Amaral (1997) e PNUD (2000), detém cerca de 2000 indústrias madeireiras (serrarias). A grande maioria dessas indústrias possui baixo rendimento, conseqüentemente, gera uma abundância de resíduos que normalmente são queimados a céu aberto, causando enorme impacto ambiental negativo.

A utilização da biomassa vegetal para fins energéticos deve ser considerada dentro do princípio de equilíbrio ecológico de desenvolvimento sustentado. Pois, mais da metade da matéria-prima, hoje, é oriunda de florestas naturais provocando ainda mais o aumento da pressão sobre essas florestas.

Em certos países, como o Brasil e a China, o uso do carvão vegetal como fonte de energia e matéria-prima em indústrias (siderurgias e metalurgias) é muito expressivo. Os Estados do Pará e do Maranhão são os dois maiores consumidores de carvão vegetal da Amazônia Legal com cerca de 1000.000ton./ano, com uma tendência de aumento da produção e do consumo de carvão vegetal (Bernadin e Matos, 1997).

Considerando todos esses aspectos, sugere-se neste estudo, o aproveitamento de resíduos de serraria, como fonte alternativa de matéria prima, para produzir carvão vegetal, visando a redução de áreas de florestas naturais exploradas para fins energéticos, assim como, a sua utilização mais adequada para minimizar o impacto sobre o meio ambiente, especialmente dentro da ótica de utilização racional e maximização dos recursos florestais existentes na região.

A característica da madeira (densidade básica) e a influência das condições de carbonização (tempo de permanência no patamar final de carbonização) sobre as propriedades físicas, químicas e mecânica do carvão vegetal, visto que, estas são de suma importância para selecionar espécies potenciais para produção de carvão vegetal, encontram-se abordadas no capítulo 2. E a potencialidade energética da madeira convertível em carvão vegetal, com base no rendimento gravimétrico e poder calorífico superior, e a estimativa da redução da área de florestas para fins energéticos, a partir de consulta bibliográfica referente a quantidade de resíduos de processamento primário de madeira por ano no Estado do Pará e de biomassa seca produzida em diversos tipos de floresta tropical amazônica (primárias e secundárias) e floresta plantada, apresenta-se no capítulo 3.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bernadin, Y.; Matos, R. 1997. *Etude de faisabilité au Brésil, par l'Antenne ERAI de San Paulo – BRESIL*. Agence Française pour la maitrise de L'énergie. Association bois de feu. Centre Technique Forestier Tropical. Édisup. 38p.
- Numazawa, S. 1986. *Aproveitamento de resíduos da exploração florestal em Curua-Uma/Pa, para produção de carvão vegetal*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 126p.
- PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. 2000. *Processamento e Comercialização de Madeira e Produtos da Madeira: Comercialização de Produtos Madeiros da Amazônia*. Brasília/DF. 70p.
- Revista Brasil Madeira. 1980. 42:14-19
- Veríssimo, A.; Amaral, P. 1997. Importância da criação de FLONAs na Amazônia Brasileira. (Versão preliminar). IMAZON, Belém. 60p.
- Vidal, E.; Gerwing, J.; Barreto, P.; Amaral, P.; Johns, J. 1997. Redução de desperdícios na produção de madeira na Amazônia. IMAZON: Instituto do Homem e do Meio Ambiente da Amazônia. *Série Amazônia*, 5:18
-

CAPITULO 2

CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL E RENDIMENTO DOS PRODUTOS DE PIROLISE DAS MADEIRAS DE *Hymenolobium* sp., *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl E *Hymenaea courbaril* L.

RESUMO

Esta pesquisa motivou-se pela carência de informações técnicas relacionadas a influência do fator tempo de permanência no patamar final de carbonização nas propriedades do carvão vegetal, tendo como objetivo avaliar as características físicas, químicas e mecânica do carvão vegetal de resíduos das espécies: *Hymenolobium* sp (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), as quais foram carbonizadas em um forno elétrico durante os tempos de permanência no patamar final de carbonização de 2 e 4 horas a uma temperatura de 500°C com taxa de aquecimento de 6,7°C/min. O delineamento experimental utilizado foi o completamente ao acaso, em arranjos fatoriais de 3 x 2 com 3 repetições. Os dados obtidos foram analisados pelo Sistema de Análise Estatística (SAEG). As propriedades do carvão vegetal estudadas foram: rendimento gravimétrico (%); densidade básica aparente (g/cm³); poder calorífico superior (Kj/Kg); teores de carbono fixo (%); materiais voláteis (%); cinzas (%) e friabilidade (%). Além destas propriedades foi avaliado o rendimento dos produtos derivados de pirólise da madeira. Os resultados mostram que tempo de permanência no patamar final de carbonização exerce influência altamente significativa em todas as propriedades do carvão, com exceção da densidade aparente e do teor de cinzas. Todas as espécies estudadas são promissoras para obter alto rendimento gravimétrico em carvão com alta densidade e características energéticas semelhantes às outras espécies potenciais.

Palavras-chave: Madeiras; Carvão vegetal; Pirólise e Carbonização.

CHARACTERISTICS OF THE CHARCOAL AND REVENUE OF THE PRODUCTS OF PYROLYSES OF THE WOODS OF THE *Hymenolobium* sp., *Manilkara amazonica* (Huc.)

Standl AND *Hymenaea courbaril* L.

ABSTRACT

This research was motivated by the lack of technical information related to the influence of the factor time of permanence in the final level of carbonization of the charcoal properties, it has as objective to evaluate the physical, chemical and mechanical characteristics of the charcoal of the residues species: *Hymenolobium* sp (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) and *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), which were charred in an electric oven during the time of permanence in the final level of carbonization of 2 and 4 hours to a temperature of 500°C with rate of heating of 6,7°C/min. The experimental outline was used completely at random maybe the to the, in factual arrangements of 3 x 2 with 3 repetitions. The obtained data were analyzed by the System of Statistical Analysis (SAEG). The properties of the studied charcoal consist of: gravimetrical revenue (%); apparent basic density (g/cm³); calorific superior power (Kj/Kg); drift of fixed carbon (%); volatile materials (%); and ashes (%) and the capability of being cold (%). Besides these properties it was evaluated the revenue of the derived products of pyrolyses of wood. The results show that the time of permanence in the final level of carbonization has a high and meaningful influence over all the properties of the charcoal, except for the apparent density and of the drift of ashes. All the studied species are promising to obtain high revenue gravimetrical in charcoal with high density and energetic characteristics similar to the other potential species.

Key-words: Woods; Charcoal; Pyrolyses and Carbonization.

2.1. INTRODUÇÃO

O Brasil já é o maior consumidor e produtor mundial de carvão vegetal. A demanda deste produto, ainda continua crescendo, em particular na região norte do Brasil, devido principalmente ao aumento do número de indústrias siderúrgicas, onde o carvão vegetal é uma matéria-prima essencial de alto custo na elaboração de seus produtos. Por isso, esperam sempre obter com qualidade superior ao disponível no mercado, visando minimizar os custos de produção e maximizar os lucros.

A espécie ideal para produzir carvão vegetal para uso em siderurgia, por exemplo, é a que apresenta maior rendimento em produto sólido (carvão vegetal) com alta densidade, e que este tenha alto poder calorífico, baixo teor de materiais voláteis e cinzas, conseqüentemente, alto teor de carbono fixo e seja pouco friável (FAO, 1983). Mas, vários são os fatores que influenciam nas propriedades do carvão vegetal durante a carbonização, como a temperatura, tempo, teor de umidade da madeira, comprimento das peças, espessura e outros. Dentre estes fatores, o tempo de permanência no patamar final de carbonização foi considerado primordial nesta pesquisa por estar diretamente relacionado com o custo/benefício do sistema produtivo e seu efeito ter sido ainda pouco estudado nas espécies amazônicas.

O objetivo deste estudo foi observar o comportamento dos resíduos de madeira de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), frente à pirólise, para determinar os rendimentos de sólido (carvão vegetal), líquido condensável e do gás não-condensável, bem como as características físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal obtido.

2.2. REVISÃO DE LITERATURA

2.2.1. Composição química da madeira

A composição química elementar da madeira é basicamente de carbono, hidrogênio e oxigênio. Existem ainda, o nitrogênio e os sais minerais, que somados, não chegam a representar nem 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, hemicelulose e lignina (Tabela 2), (Oliveira *et al.*, 1982a).

Tabela 1. Composição química elementar da madeira.

Composição química, %	Referências			
	Goldstein (1978)	Charles (1982)	Kanvry e Blackshear (1970)	Média Geral
Carbono	50,0	48,5-50,5	50,0	50
Oxigênio	44,0	43,0-45,0	43,5	43,5
Hidrogênio	6,0	6,0-7,0	6,0	6
Nitrogênio e cinzas	<1,0			<1,0
Nitrogênio			0,1	0,1
Cinzas			0,4	0,4

Fonte: Oliveira *et al.* (1982a).

* - Madeira seca ao ar

** - Madeira anidra

Os componentes elementares da madeira sofrem uma pequena variação dentro de uma estreita faixa, dependendo da espécie vegetal, idade, tipo de terreno, clima, etc. (Oliveira *et al.*, 1982a).

Tabela 2. Componentes estruturais da madeira.

Componentes estruturais da madeira.						
Componentes, %	Referências					Média Geral
	Goldstein (1978)	Charles (1982)	Kanvry e Blackshear (1970)	Thomas (1977)		
				*	**	
Celulose	50	30 - 63	40	40 - 44	43 - 47	44,7
Hemicelulose	25	20 - 30	40	25 - 29	25 -35	29,4
Lignina	25	20 -30	20	25 - 31	16 - 24	23,6
Extrativos				1 - 5	2 - 8	4
Fonte: Oliveira <i>et al.</i> (1982a).						

Fonte: Oliveira *et al.* (1982a).

* - Madeira macia

** - Madeira dura

Os componentes estruturais da madeira apresentam uma maior variação em relação aos componentes elementares, ocorrendo em proporções diferentes em função do tipo de madeira: folhosa ou conífera, macia ou dura, etc. Em torno de 85 a 95% do peso da madeira seca ao ar são representados pela soma desses componentes, razão pela qual se diz que o comportamento deles representa o comportamento da madeira (Oliveira *et al.*, 1982a).

2.2.2. Definição de carbonização e/ou destilação seca da madeira

Carbonizar madeira, consiste em aquecê-la ao abrigo do ar, até sua decomposição parcial, resultando uma parte em carvão vegetal e a outra parte em produtos voláteis, condensáveis ou não, denominados produtos da destilação da madeira. Por isso são utilizados dois termos equivalentes para o mesmo processo químico: “carbonização”, quando se objetiva a obtenção de carvão vegetal como produto mais importante, ou então, “destilação seca”, se a retenção de produtos químicos representar o fator econômico de maior importância (Brito e Barrichelo, 1981). Diante destas definições, neste trabalho foi usado o termo carbonização.

2.2.3. Evolução da carbonização da madeira

Durante o processo de conversão da madeira para carvão vegetal, ocorrem várias transformações relativamente complexas, onde muitos mecanismos de reações, ainda não são explicados.

Doat e Petroff (1975) desenvolveram um modelo para explicar as diversas formas de transferência de calor que ocorrem durante a formação do carvão vegetal. Onde, descreveram a evolução teórica da carbonização da madeira em uma retorta, como sendo a seguinte (Tabela 3): Fase A – com temperatura de 150°C a 170°C. Esta fase se caracteriza pela liberação de água contida na madeira. Fase B – com temperatura de 170°C a 270 – 280°C. Ocorre a liberação de CO e CO₂, acompanhados de pequena quantidade de vapores condensáveis contendo ácido acético e metanol. O alcatrão formado ainda é insignificante. Fase C – inicia-se a reação exotérmica de decomposição, liberando cerca de 210 quilocalorias por quilo de madeira. Esta reação 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. A formação de ácido acético, metanol, acetona, acetato de metila, álcool álco, etc., atinge seu valor máximo. Fase D — corresponde à fase com temperatura de 400°C, onde praticamente termina a carbonização. A partir dessa fase se a temperatura for elevada, então ocorre a dissociação do carvão. A liberação de hidrocarbonetos aumenta até 500°C. Com a temperatura acima desse limite, os hidrocarbonetos são pouco a pouco substituídos pelo hidrogênio. O processo é então, denominado de fase do hidrogênio.

Tabela 3. Evolução da carbonização da madeira.

Pedido de carbonização	Saída de água	Saída de gases oxigenados	Início da saída de hidrocarbonet os	Fases de hidrocarbonet os C_mH_n	Dissociação	Fases do hidrogênio
Temperatura (°C)	150 - 200	200 - 280	280 - 380	380 - 500	500 - 700	700 - 900
Teor de carbono (% do carvão vegetal)	60	68	78	84	89	91
Gases não-condensáveis (%)						
- CO ₂	68	66,5	35,5	31,5	12,2	0,5
- CO	30	30,0	20,5	12,3	24,6	9,7
- H ₂	0	0,2	6,5	7,5	42,7	80,9
- Hidrocarbonetos	2	3,3	37,5	48,7	20,5	8,9
Poder calorífico por m ³ de gás, em calorías	1.100	1.210	3.920	4.780	3.630	3.160
Constituintes condensáveis no gás						
Quantidade de gás	Vapor d' água	Vapor d' água e ácido acético	Ácido acético, álcool metílico e alcatrão leve	Muito alcatrão pesado	alcatrão	Pouca condensação
	Muito pouca	Pouca	importante	importante	pouca	Muito pouca

Fonte: Doat e Petroff (1975)

2.2.4. Produtos obtidos na carbonização da madeira

Quando a madeira é submetida à ação do calor, ocorre uma destruição gradativa dos seus componentes estruturais (celulose, hemicelulose e lignina), que se degradam de diferentes formas sucessivas, dando origem a diversos compostos de natureza sólida (carvão vegetal), líquida (produtos condensáveis) e gasosa (gases incondensáveis) (Brito e Barrichelo, 1981). Mais de 213 compostos diferentes são formados na carbonização da madeira (Beall e Eickner, s.d.).

Uhart (1976), apresenta os resultados quantitativos e qualitativos dos produtos obtidos na carbonização de 16 madeiras da Amazônia, sob temperatura de 500°C (Tabela 4).

Tabela 4. Produtos obtidos na carbonização de 16 madeiras da Amazônia.

Produtos	Rendimento (base seca), %
Produto sólido:	
- Carvão vegetal	33,72
Produto líquido:	
- Ácido acético	5,73
- Acetona + ácido fênico	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
Produto gasoso:	
-CO, CO ₂ , H ₂ , hidrocarbonetos	17,50
Total	100

Fonte: Uhart (1976)

Trugilho *et al.* (1991), estudaram 12 espécies de madeira (nativas da Amazônia e exóticas), e obtiveram resultados quantitativos dos produtos gerados na carbonização da madeira sob uma temperatura final variando de 450°C a 500°C, com uma taxa de aquecimento de 50°C a cada 30 minutos, iniciando-se sempre da temperatura de 100°C (Tabela 5).

Tabela 5. Produtos obtidos na carbonização de madeiras nativas da Amazônia e exóticas.

Espécie	Rendimento (% em Relação Madeira Seca)			
	Carvão vegetal	Líquido Pirolenhoso	Gás não Condensável	Carbono Fixo
Amapá	33,82	48,39	17,79	24,85
Pau-Rainha	41,95	40,97	17,08	30,94
Mamorana	35,21	41,13	23,66	24,79
Guaríuba	39,00	44,36	16,65	27,60
Inharé	35,56	45,19	19,25	27,24
Pau-de-balsa	33,18	48,56	18,11	23,19
Embaubarana	34,21	47,34	18,45	25,70
Cardeiro	36,52	42,79	20,69	26,35
Antocéfalos	34,68	45,55	19,77	26,38
Eucalipto	38,32	43,45	18,23	27,38
Gmelina	35,24	41,31	23,45	26,78
Pinos	36,55	45,70	17,75	25,44

Fonte: Trugilho *et al.* (1991)

As porcentagens do rendimento em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases incondensáveis, variam conforme as espécies (Brito e Barrichelo, 1981; Trugilho *et al.*, 1991) e as técnicas de carbonização da madeira empregadas (Wenzl, 1970; Oliveira *et al.*, 1982b; Brito e Barrichelo, 1981).

De acordo com os resultados de estudos realizados por alguns pesquisadores, as madeiras de espécies folhosas tropicais amazônicas apresentam rendimentos superiores em carvão vegetal e gases não condensáveis que as demais espécies (Tabela 6).

Tabela 6. Rendimento dos produtos de carbonização de madeira.

Rendimento %	Folhosas Amazônicas	Folhosas Francesas	<i>Gmelina</i> <i>arborea</i>	<i>Eucalyptus</i> <i>saligna</i>
Carvão vegetal	33,7	30,1	30,6	32,4
Pirolenhoso	48,8	53,1	50,1	49,7
Gases não- condensáveis	17,7	15,1	17,7	14,7

Fonte: Brito e Barrichelo (1981); Pandolfo (1977); Petroff e Doat (1978).

2.2.5. Fatores que influenciam nas propriedades do carvão vegetal

2.2.5.1. Temperatura de carbonização

2.2.5.1.1. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

A temperatura final de carbonização influencia sensivelmente no rendimento gravimétrico do carvão vegetal. Quanto maior a temperatura, maior é o grau de destilação, refletindo, portanto, no aumento da quantidade de gases e vapores, causando conseqüentemente a redução no rendimento em peso do carvão vegetal (Gomes e Oliveira, 1980).

Veado *et al.* (1977) experimentaram carbonizar madeiras de *Eucalyptus marginata*, sob as temperaturas de 450°C e 650°C e obtiveram rendimento em carvão vegetal na ordem de 35% e 28%, respectivamente.

Harris (1978), ao carbonizar madeiras de eucaliptos da Austrália, encontrou os valores de rendimento em carvão vegetal em função da temperatura de carbonização (Tabela 7).

Tabela 7. Rendimento em carvão vegetal em diferentes temperaturas de carbonização.

Temperatura - °C	Rendimento em carvão (%)
400	40,0
450	35,0
550	31,5
650	28,0

Fonte: Harris (1978).

Valente *et al.* (1985), ao carbonizarem madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden, encontrou os seguintes valores de rendimento gravimétrico em carvão vegetal a diferentes níveis de temperatura de carbonização (Tabela 8).

Tabela 8. Rendimentos gravimétricos médios de carvão vegetal em diferentes temperaturas de carbonização, em relação à madeira seca.

Temperatura - °C	Rendimento em carvão (%)
300	44,49
375	36,42
450	32,79
525	30,05
600	28,63

Fonte: Valente *et al.* (1985).

Essa tendência de decréscimo de rendimento em carvão vegetal em função do aumento da temperatura, que também facilita a dissociação do carvão vegetal com liberação dos gases, bem como gaseificar parte da estrutura sólida do mesmo, conseqüentemente diminui o rendimento em carvão vegetal (Almeida, 1982).

2.2.5.1.2. Densidade aparente do carvão vegetal

A densidade aparente do carvão vegetal está relacionada com a perda de massa e a contração volumétrica que a madeira sofre durante a carbonização.

Beall e Eickner (s.d) e Krila (1980), mencionam que a maior perda de massa e a maior contração volumétrica ocorrem na faixa de temperaturas de 200 a 400°C.

A influência da temperatura sobre a densidade aparente do carvão vegetal é conflitante segundo as literaturas.

Blankenhorn *et al.* (1978) observaram que as densidades dos carvões vegetais produzidos com madeiras de *Prunus serotina* Erth, apresentaram variações, tendo-se registrado os menores valores sob temperaturas de 500°C e 600°C (Tabela 9).

Tabela 9. Influência da temperatura de carbonização sobre a densidade do carvão vegetal.

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

Fonte: Blankenhorn *et al.* (1978).

Mendes *et al.* (1982) também observaram comportamento semelhante com madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill, carbonizadas sob temperaturas de 300°C, 500°C e 700°C. Os menores valores foram obtidos com carvões vegetais produzidos sob temperatura de 500°C. Isto comprova que a temperatura de carbonização influencia, de uma forma ou de outra, na densidade aparente do carvão vegetal. A grande limitação dessas citações é que não fazem uma discussão clara sobre o assunto. Deduz-se, no entanto, que na faixa de temperatura em que ocorre uma redução da densidade aparente do carvão vegetal, o efeito da contração seja menor do que o efeito da perda de massa do material carbonizado.

2.2.5.1.3. Composição química do carvão vegetal

Segundo Wenzl (1970), a composição química elementar do carvão vegetal varia sensivelmente com a temperatura final de carbonização (Tabela 10).

Tabela 10. Variação da composição química elementar do carvão vegetal em diferentes temperaturas.

Temperatura - °C	Composição química elementar (%)		
	C	H	O
200	52,3	6,3	41,4
300	73,2	4,9	21,9
400	82,7	3,8	13,5
500	89,6	3,1	6,7
600	92,6	2,6	5,2
800	95,8	1,0	3,3
1000	96,6	0,5	2,9

Fonte: Wenzl (1970).

Harris (1978) ao carbonizar madeiras de eucaliptos australianos, sob diferentes temperaturas, encontrou os seguintes valores percentuais de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas (Tabela 11).

Tabela 11. Análise química imediata do carvão vegetal de eucaliptos da Austrália em diferentes temperaturas de carbonização.

Temperatura °C	Análise química imediata do carvão vegetal (%)		
	C.F.	M.V.	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).

C.F. (Carbono Fixo)

M.V. (Materiais Voláteis)

É mencionado no trabalho de Wenzl (1970) que o teor de carbono fixo aumenta rapidamente com o acréscimo da temperatura de carbonização, e alcança um valor quase constante próximo à temperatura de 700°C.

O conteúdo de materiais voláteis do carvão vegetal é uma função da temperatura de carbonização. A partir de 750°C, o teor de materiais voláteis é sensivelmente reduzido (Humphreys, 1980).

Os resultados obtidos por Wenzl (1970), Harris (1978) e Humphreys, (1980), determinam com muita clareza que quanto maior a temperatura de carbonização, maior é o teor de carbono fixo, e por conseguinte, menor o de materiais voláteis remanescentes no carvão vegetal.

Collet (1956) e Earl (1974) citam que o teor de cinzas depende diretamente da quantidade de materiais inorgânicos existentes na madeira carbonizada. Lamaxana (s.d.) diz que o teor de cinzas do carvão vegetal varia com a espécie e o meio ambiente em que se desenvolve.

2.2.5.1.4. Poder calorífico superior do carvão vegetal

Uma variável que também influencia no poder calorífico do carvão vegetal é a temperatura de carbonização.

Oliveira *et al.* (1982a) e Satonaka (1982), citam que o poder calorífico do carvão vegetal atinge um valor máximo numa faixa de temperatura de 500°C, em comparação com o de 300°C, é resultante do maior acúmulo de carbono fixo e elevado calor de combustão dos materiais voláteis contidos no carvão vegetal. Por outro lado, apesar do maior acúmulo de

carbono fixo no carvão vegetal produzido sob 700°C, em relação ao de 500°C, percebe-se um pequeno decréscimo do calor de combustão, isto decorrente possivelmente de pequena quantidade de materiais voláteis de elevado calor de combustão (Oliveira *et al.*, 1982a).

Segundo Satonaka (1982), a razão da pequena diminuição do poder calorífico superior do carvão vegetal na faixa de temperatura superior a 600°C, possivelmente é devido ao grande efeito da diminuição da porcentagem de hidrogênio em relação ao efeito do aumento da porcentagem de carbono fixo

Se tomarmos a fórmula teórica do poder calorífico superior do carvão vegetal (Equação 1) apresentada por Mendes *et al.* (1982) e substituirmos os valores de carbono fixo, hidrogênio e oxigênio encontrados por Wenzl (1970), sob diversas temperaturas, os maiores valores de poder calorífico, são alcançados com os carvões vegetais produzidos sob 500°C e 600°C (Tabela 12).

Tabela 12. Poder calorífico superior do carvão vegetal com base na composição química elementar.

Temperatura °C	Composição química elementar do carvão vegetal (%)			PCS _(teórico) Kcal/Kg
	C	H	O	
200	52,3	6,3	41,4	4.618
300	73,2	4,9	21,9	7.140
400	82,7	3,8	13,5	7.416
500	89,6	3,1	6,7	8.026
600	92,6	2,6	5,2	8.163
800	95,8	1,0	3,3	7.959
1000	96,6	0,5	2,9	7.871

Fonte: Wenzl (1970)

$$* PCS_{(teórico)} = \frac{\%C \times 8100}{100} + \frac{3400}{100} \times \frac{\%H - \%O}{8} \quad [\text{Equação 1}]$$

onde,

PCS_(teórico) - Poder calorífico superior do carvão vegetal (kcal/kg)

C - Carbono

H - Hidrogênio

O - Oxigênio

O calor de combustão do carvão vegetal, segundo Baileys e Blankenhorn (1982), aumenta proporcionalmente com o acréscimo da temperatura de carbonização. O conteúdo de

carbono fixo é aumentado através do processo contínuo de carbonização, conseqüentemente, elevando o poder calorífico superior do carvão vegetal.

De acordo com Earl (1974), o poder calorífico e a quantidade de carbono fixo são quase diretamente proporcionais no carvão vegetal. É provável que o carvão vegetal com alto teor de materiais voláteis tenham menor poder calorífico do que aquele com baixo teor, conseqüentemente maior teor de carbono fixo.

2.2.5.1.5. Friabilidade do carvão vegetal

A friabilidade do carvão vegetal é uma propriedade que varia também 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, a temperaturas de 300°C, 500°C e 700°C, obtiveram valores de finos abaixo de 13mm em porcentagem de 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.

Porém, de acordo com Coutinho e Ferraz (1988), a quantidade de finos é diretamente proporcional ao aumento da temperatura de carbonização, ou seja, quanto maior a temperatura maior é a quantidade de finos produzidos (Tabela 13).

Tabela 13. Rendimento percentual em finos de carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

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

Fonte: Coutinho e Ferraz (1988)

2.2.5.2. Tempo de carbonização

2.2.5.2.1. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal

Slocum *et al.* (1978) verificaram em um experimento, que o rendimento em carvão vegetal é reduzido em cerca de 8% quando o tempo de permanência no patamar final de carbonização de 400°C e 600°C, foi aumentado de 0 para 50 horas. Para a temperatura de 800°C, o aumento de zero para 12 e 114 horas refletiram numa redução de rendimento em carvão vegetal em torno de 3% e 10%, respectivamente.

Portanto, quanto maior o tempo de permanência no patamar final de carbonização menor é o rendimento em carvão vegetal. Esses resultados estão de acordo em parte com a argumentação de Gomes e Oliveira (1980), onde relatam que quanto maior o tempo de carbonização da madeira maior é a quantidade de gases produzidos, conseqüentemente, reduzindo o rendimento em peso do carvão vegetal.

2.2.5.2.2. Densidade aparente do carvão vegetal

A perda de massa é um dos parâmetros considerado, que está relacionado com a densidade do carvão vegetal. É importante ressaltar que, de acordo com Nanassy e Fung (1975), os fatores temperatura e tempo de carbonização fazem o percentual de massa variar. Para temperaturas superiores a 400°C, a perda de massa tende à estabilidade a partir de trinta minutos. O tempo de carbonização, provavelmente, é o fator principal da perda de massa na faixa de zero a trinta minutos.

Mendes *et al* (1982) comentam que o tempo de carbonização exerce influência na densidade aparente do carvão vegetal. Os carvões vegetais obtidos através de uma rápida carbonização (2 horas) apresentaram menores densidades do que os obtidos de uma lenta (72 horas). Os valores médios obtidos foram respectivamente de 0,46 g/cm³ e 0,70g/cm³.

Conclui-se desta forma que o tempo de carbonização também influencia a densidade do carvão vegetal, sendo mais significativo para carbonização com alta taxa de aquecimento, ou seja, carbonização rápida.

2.2.5.2.3. Composição química do carvão vegetal

No estudo realizada por Oliveira *et al.* (1982a) foi observado que a medida que se aumenta a taxa de aquecimento, os teores de carbono fixo variam de forma crescente e os materiais voláteis variam de forma decrescente.

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

A quantidade de materiais voláteis é uma função do tempo em que a madeira é exposta ao calor (Lamaxana, s.d.).

É importante observar que 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.

Esses resultados vêm em parte concordar com a argumentação de Gomes e Oliveira (1980), de que a quantidade de gases liberados na carbonização da madeira está em função do seu grau de degradação térmica.

2.2.5.2.4. Poder calorífico superior do carvão vegetal

O tempo de carbonização da madeira exerce influência no poder calorífico superior do carvão vegetal. Numazawa (1986) experimentou carbonizar madeiras a 10 e 30 minutos no patamar final de carbonização e verificou que os valores de poder calorífico superior do carvão foram maiores no tempo de 30 minutos no patamar final de carbonização. No entanto, ressalta-se que o tempo de carbonização influencia nos teores de carbono fixo (Korobkin, 1950) e materiais voláteis (Lamaxana, s.d.), e espera-se que ele também afete o poder calorífico do carvão vegetal, uma vez que este está na dependência do calor de combustão dos respectivos componentes químicos.

Segundo Petroff e Doat (1978), o poder calorífico superior do carvão vegetal aumenta à medida que a porcentagem de carbono fixo se eleva. Com relação à influência dos materiais voláteis no poder calorífico do carvão vegetal, esses autores observaram que os carvões vegetais que apresentaram as porcentagens na faixa de 13 a 14% desses produtos voláteis liberaram maior quantidade de energia durante a combustão.

Isto demonstra que o poder calorífico do carvão vegetal é influenciado pelos componentes químicos do carvão vegetal.

2.2.5.2.5. Friabilidade do carvão vegetal

Mendes *et al.* (1982) mostram a influência da taxa de aquecimento de carbonização na friabilidade do carvão vegetal. Quanto maior a velocidade de carbonização mais friável será o carvão vegetal, ou seja, o carvão vegetal será menos estável que o produzido a uma carbonização lenta. (Tabela 14).

Tabela 14. Friabilidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* W. Hill, produzido a 430°C.

Velocidade de carbonização (°C/min)	Finos abaixo de ½" gerados por tamboramento (%)
0,1	11
3,4	18

Fonte: Mendes *et al.* (1982)

2.2.6 - Efeito do teor de umidade da madeira na produção de carvão vegetal

Uma outra variável que também influencia na produção de carvão vegetal, em processo de combustão parcial, é o teor de umidade.

Ao carbonizar várias madeiras com diferentes teores de umidade, Earl (1974) observou que quanto maior a porcentagem dessa variável menor é a produção de carvão vegetal em kg/volume estére, e também maior é o tempo de carbonização.

Para Oliveira *et al.* (1982a), quanto mais alto o teor de umidade na madeira, maior será a quantidade de energia necessária para evaporar a água durante o processo de carbonização, conseqüentemente, reduzindo o rendimento em peso do carvão vegetal.

Mendes *et al.* (1982) carbonizaram madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill com diferentes teores de umidade e mostraram que quanto maior o teor de umidade da madeira, maior é a quantidade de finos gerados nos testes de tamboramento.

O teor de umidade exerce influência na qualidade e produção econômica do carvão vegetal (Karchesy e Koch, 1979)

2.3. MATERIAL E MÉTODOS

2.3.1. Local de origem do material

Os materiais de estudo foram resíduos de madeira provenientes de indústrias madeireiras sediadas em Paragominas/PA. O município possui uma área de aproximadamente 22.313 Km², tendo o seu centro geográfico nas coordenadas: 02°59'45" de Latitude Sul e 47°21'10" de Longitude W. Gr. Portanto, localizado na região leste do Estado do Pará, dentro dos seguintes limites: município de Irituia ao norte, Estado do Maranhão ao leste e ao sul, e os municípios de Mocajuba e Baião ao oeste.

O clima é tropical chuvoso com temperaturas variando entre 31°C (máxima) e 22°C (mínima).

2.3.2. Seleção dos resíduos por espécie

Para este estudo foram selecionados resíduos de três espécies florestais: *Hymenolobium* sp (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), consideradas importantes na comercialização de madeiras com maiores percentuais volumétricos no Estado do Pará, de acordo com Veríssimo *et al.* (2002).

2.3.3. Coleta do material de estudo

Os materiais que foram utilizados neste estudo originados da área descrita no item 2.3.2 correspondem às aparas e costaneiras.

Após a identificação das espécies através de observações macro e microscópicas das estruturas anatômicas da madeira, no Laboratório de Botânica – Xiloteca da Embrapa Amazônia Oriental, foram sorteadas três toras de cada espécie, das quais foram coletadas aleatoriamente amostras de resíduos após o processamento e beneficiamento destas. Essas amostras foram transportadas à Belém, ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da UFRA (Universidade Federal Rural da Amazônia), onde foram realizados os estudos de caracterização da madeira e do carvão vegetal produzido.

2.3.4. Determinação da densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com a Norma MB 1269/79 da ABNT (Associação Nacional de Normas Técnicas), utilizando a equação 2.

$$D_{(bás.)} = \frac{P_{(m.s.)}}{V_{(m.sat.)}} \quad \text{[Equação 2]}$$

onde,

$D_{(bás.)}$ – Densidade básica da madeira (g/cm^3).

$P_{(m.s.)}$ – Peso do corpo de prova completamente seco em estufa à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (g).

$V_{(m.sat.)}$ – Volume do corpo de prova completamente saturado em água destilada (cm^3).

Das amostras coletadas foram utilizados dez corpos de prova retirados aleatoriamente por espécie estudada para determinar a densidade básica da madeira.

Os corpos de prova foram primeiramente submersos em água destilada dentro de um dessecador acoplado a uma bomba a vácuo, até atingirem o ponto de saturação das fibras (Figura 1). Esta condição de saturação foi observada, fazendo-se pesagens diárias em balança analítica com precisão de 0,01g. A madeira foi considerada saturada no momento em que o peso do corpo de prova se manteve constante em 3 pesagens consecutivas.



Figura 1. Saturação dos corpos de prova.

O volume do corpo de prova saturado foi determinado, adotando-se o método do Princípio de Arquimedes, recomendado pela COPANT (Comissão Panamericana de Normas Técnicas) 461, que consiste em submergir o corpo de prova em um recipiente com volume de água destilada conhecido, colocando sobre uma balança analítica. A água deslocada pela madeira submersa é igual ao peso obtido na balança, que também é equivalente ao volume do corpo de prova (Figura 2).

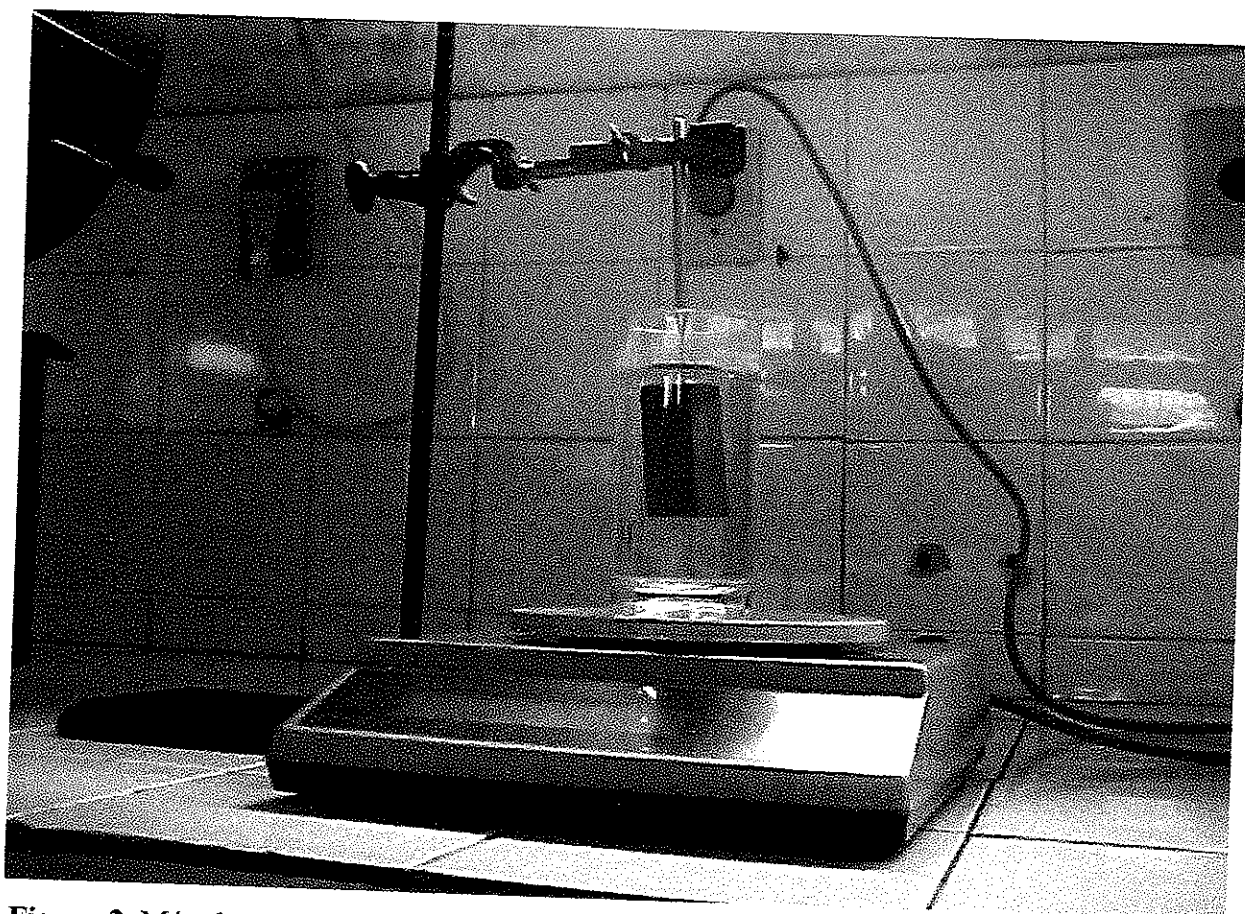


Figura 2. Método de determinação do volume saturado dos corpos de prova.

Após a determinação do volume saturado do corpo de prova, este foi submetido à secagem em uma estufa com $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingir o peso constante. Diariamente era feita a verificação da constância do peso da seguinte forma: o corpo era retirado da estufa e colocado em um dessecador durante 10 minutos para esfriamento. Em seguida efetuava-se a pesagem com auxílio de uma balança analítica com precisão de 0.01g. No momento em que se verificou a estabilização do peso em 3 pesagens consecutivas, a madeira foi então, considerada completamente seca.

Obtidos os valores de peso seco e volume saturado do corpo de prova, a densidade básica da madeira foi determinada através da equação 2.

2.3.5. Carbonização da madeira

2.3.5.1. Preparação do material para a carbonização

Todo o material restante composto de aparas e costaneiras do item 2.3.4. de cada espécie, foi transformado em corpos de prova com as dimensões de 20 x 20mm de secção transversal e 60mm de comprimento, sem distinção entre alburno e cerne. As amostras foram preparadas com um só nível de umidade (0%), secando-os em uma estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingir o peso constante verificado da mesma maneira descrita no item 2.3.4.

2.3.5.2. Produção de carvão vegetal

A carbonização da madeira foi realizada em um forno elétrico, no qual foi introduzido um cilindro de ferro dotado de um duto condutor dos gases liberados durante o processo de carbonização (Figura 3). O cilindro utilizado tem a capacidade em torno de 250cm^3 . No total foram realizadas 18 carbonizações, sendo 6 por espécie.

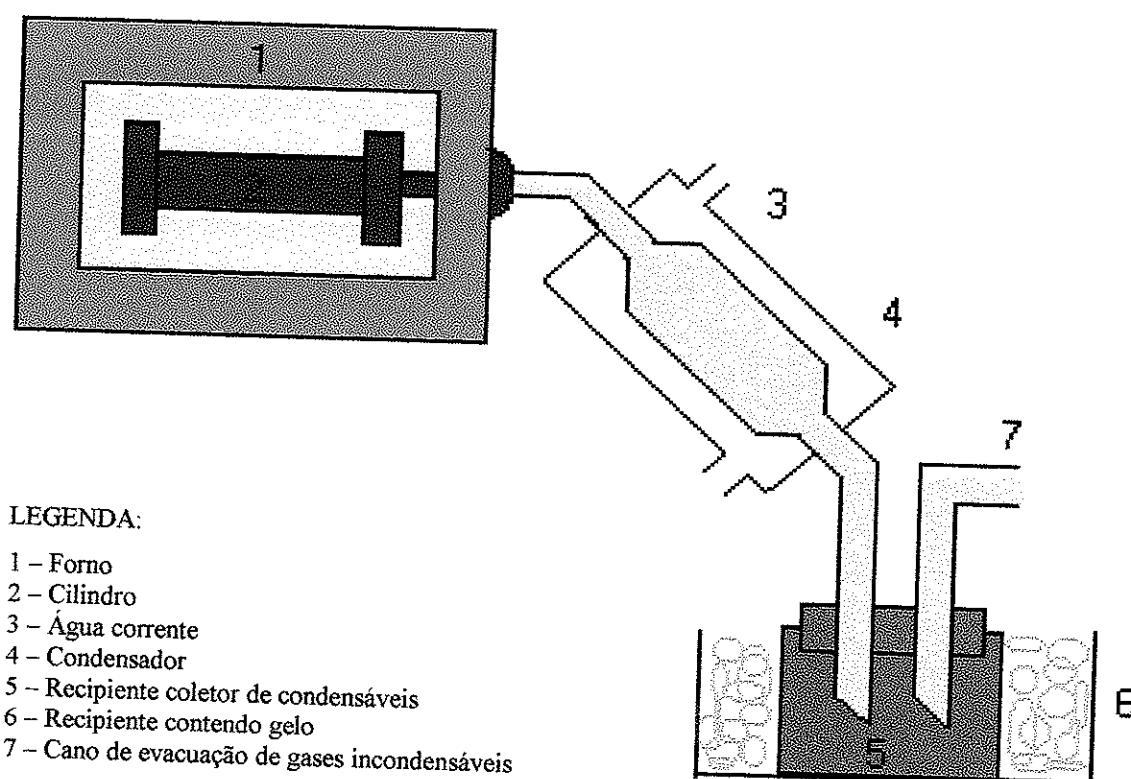


Figura 3. Esquema do equipamento usado na carbonização da madeira.

Além do fator espécie foi utilizado também neste estudo, o fator tempo de permanência no patamar final de carbonização, onde os valores adotados foram de 2 e 4 horas, pois em testes preliminares de carbonização, quando adotou-se o tempo de 2 horas, observou-se que esse tempo foi suficiente para transformar a madeira em carvão vegetal.

A temperatura de final de carbonização foi estabelecida em 500°C, temperatura comumente atingida em fornos de alvenaria.

A temperatura final de carbonização foi controlada através de termostatos e programada conforme a figura 4, com uma taxa de aquecimento média de 6,7°C/min. O 1º patamar foi para evitar a exposição brusca da madeira ao calor, e do 2º ao 4º patamar para submetê-la às reações endotérmicas e exotérmicas que ocorrem nessas faixas de temperaturas.

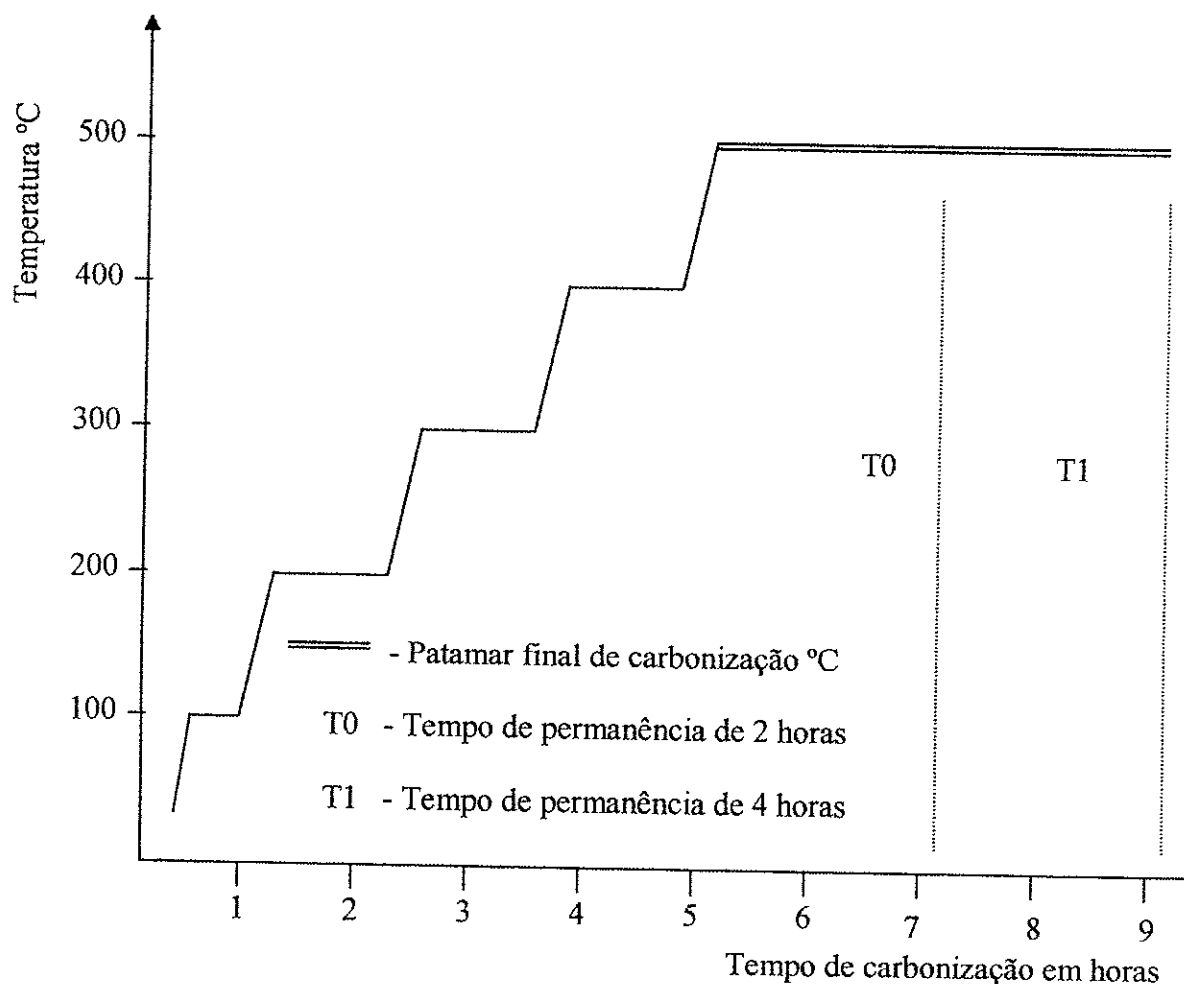


Figura 4. Elevação da temperatura até o patamar final de carbonização.

A carbonização foi considerada terminada, no momento em que o tempo de permanência no patamar final de carbonização foi atingido, desligando-se então, o aparelho.

Após o esfriamento do carvão vegetal, o cilindro de ferro era removido para retirar o carvão vegetal, que em seguida era armazenado em sacos plásticos para realização de outras análises posteriores.

2.3.5.3. *Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (base seca)*

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal à base seca foi determinado pelo quociente entre o peso do carvão vegetal seco e o peso da madeira seca enfiada.

O peso da madeira seca enfiada foi determinado no item 2.3.5.2.

O material carbonizado, referido no item 2.3.5.2., foi colocado em uma estufa com temperatura controlada à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingir o peso constante. O rendimento foi determinado através da equação 3.

$$RG_{(b.s.)} = \frac{P_{(c.s.)}}{P_{(m.s.)}} \times 100 \quad [\text{Equação 3}]$$

onde,

$RG_{(b.s.)}$ – Rendimento gravimétrico em carvão vegetal à base seca (%).

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

$P_{(m.s.)}$ – Peso da madeira seca (g).

2.3.6. *Estudo das propriedades do carvão vegetal*

O estudo das propriedades do carvão vegetal compreende: densidade aparente; poder calorífico superior; análises química imediata concernente a teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo; e friabilidade.

2.3.6.1. *Propriedades físicas*

2.3.6.1.1. Densidade aparente do carvão vegetal

Foram feitas 10 determinações para cada tratamento mediante a adaptação da Norma MB 1269/79 da ABNT, que trata da determinação de densidade básica da madeira, através da equação 4.

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

onde,

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

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

$V_{(c.sat.)}$ – Volume do carvão vegetal saturado (cm^3).

O peso e o volume foram determinados da mesma maneira como está descrita no item 2.3.4.

2.3.6.1.2. Poder calorífico superior do carvão vegetal

Para a determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal, adotou-se a Norma D 250/50 da ASTM (American Society for Testing and Material). Para tal, foi utilizada uma bomba calorimétrica adiabática (Figura 5), baseada no método de Berttelot, que consistiu na combustão do material em um ambiente fechado na presença de oxigênio e sob pressão.

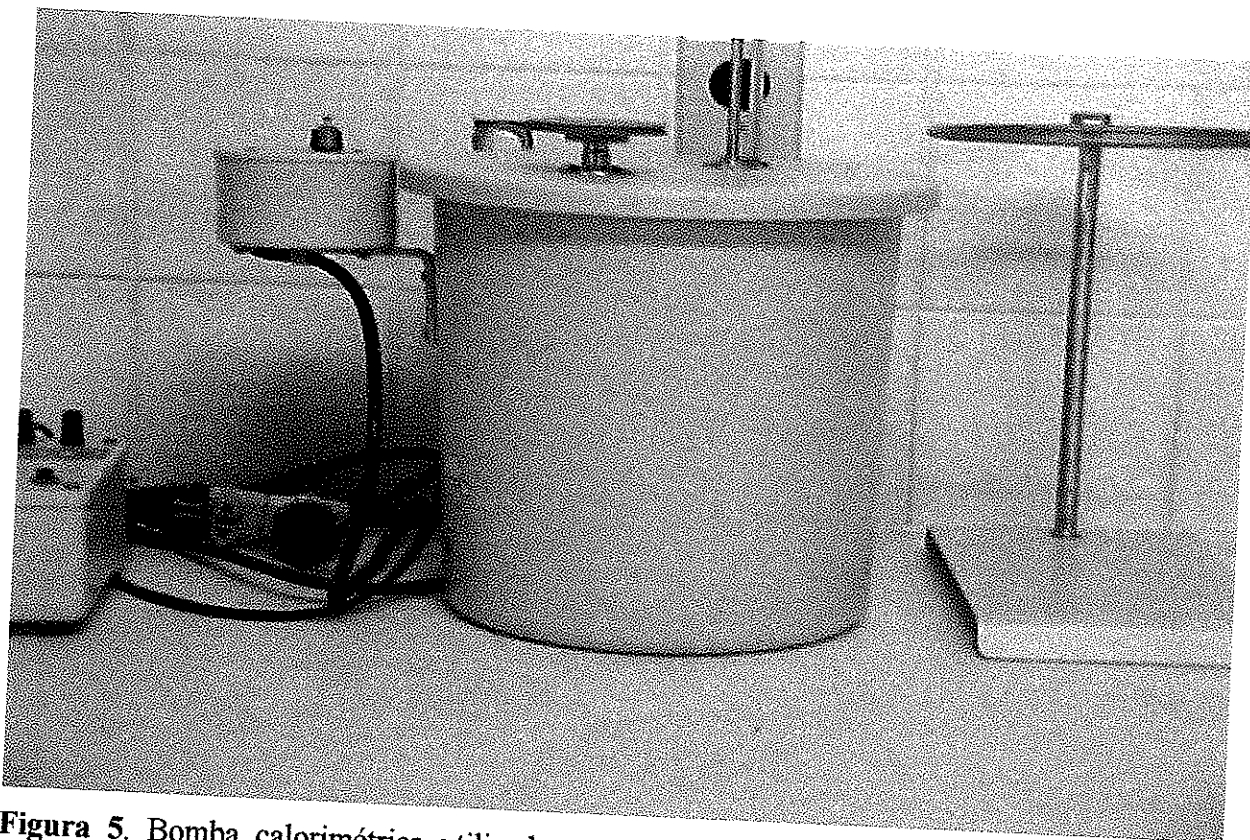


Figura 5. Bomba calorimétrica utilizada para determinar o poder calorífico superior do carvão vegetal.

2.3.6.2. *Propriedades químicas*

2.3.6.2.1. *Análise química imediata do carvão vegetal*

A outra parte do material de estudo, também devidamente codificada por resíduo e por espécie, foi transformada em partículas com uso de um gral, as quais foram classificadas granulométricamente entre 40 e 60 mesh, através de peneiras.

A análise química imediata do carvão vegetal consistiu na quantificação da porcentagem do teor de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (Tci) e de carbono fco (TCF), com base na Norma D 1762/64 da ASTM.

a) *Teor de materiais voláteis*

O teor de materiais voláteis foi determinado através da equação 5.

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

onde,

TMV – Teor de materiais voláteis (%).

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

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

b) Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado através da equação 6.

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

onde,

Tci – Teor de cinzas (%).

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

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

c) Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado através da equação 7.

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

onde,

TCF – Teor de carbono fixo (%).

TMV – Teor de materiais voláteis (%).

TCi – Teor de cinzas (%).

2.3.6.3. Propriedade mecânica (friabilidade)

A propriedade mecânica do carvão vegetal trata-se da resistência do carvão vegetal para se transformar em partículas e pó, devido ao seu manuseio (descarregamento, embalagem e transporte), a qual foi determinada através do teste de tamboramento de acordo com a Norma MB 1375/80 da ABNT.

A friabilidade foi calculada com base na equação 8.

$$F = \left(100 - \frac{P_{(c.r.)}}{P_{(c.a.t.)}} \right) \times 100 \quad [\text{Equação 8}]$$

onde,

F – Friabilidade do carvão vegetal (%).

$P_{(c.r.)}$ – Peso do carvão vegetal após o tamboramento (remanescente) (g).

$P_{(c.a.t.)}$ – Peso do carvão vegetal antes do tamboramento (g).

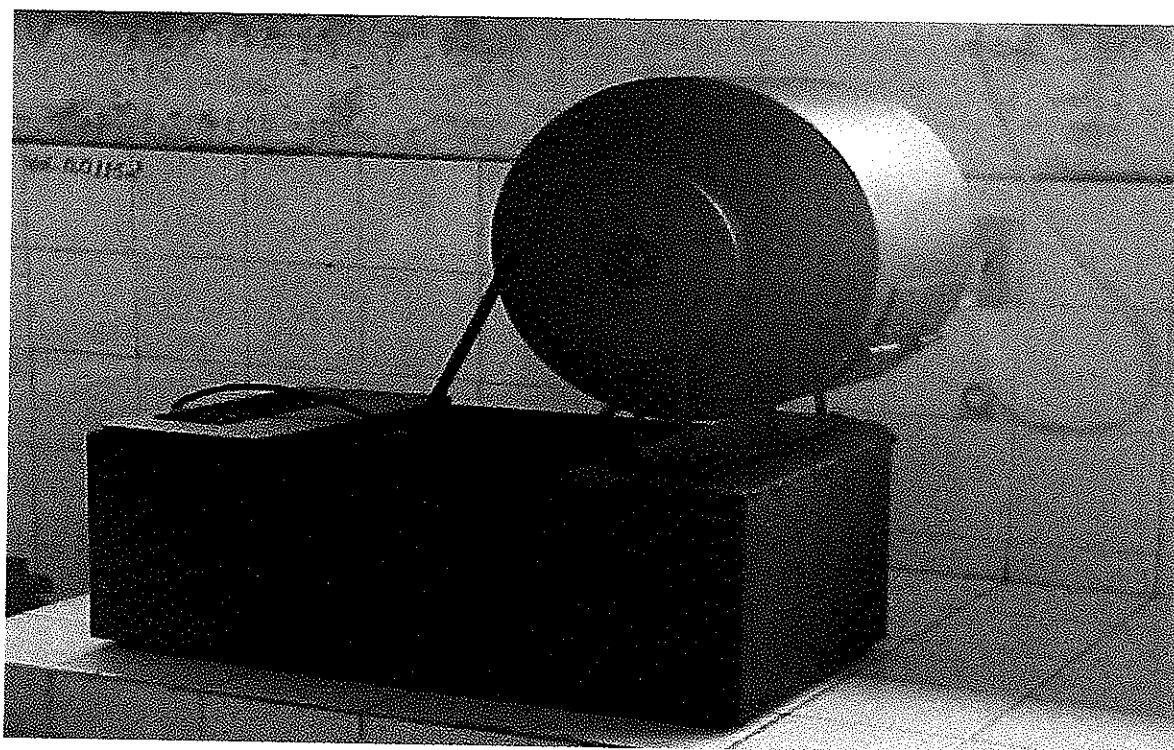


Figura 6. Tambor rotativo utilizado na realização do teste de tamboramento.

2.3.7. Análises estatísticas

As variáveis de resposta foram analisadas, através do delineamento experimental completamente ao acaso, em arranjos fatoriais de 3 x 2 (Tabela 15), seguindo-se a metodologia de Steel e Torrie (1960). Cada tratamento foi repetido três vezes, totalizando 18 ensaios.

Primeiro foram feitos os testes de análise de variância e em seguida os testes de significância pelo método de SNK ao nível de 1% de probabilidade, através do programa de Análises Estatísticas – SAEG.

Os fatores e níveis adotados foram:

Tabela 15. Fatores e níveis especificados de estudo.

Fator	Nível	Espécie
A (espécie)	a ₀	<i>Hymenolobium</i> sp (A)*
	a ₁	<i>Manilkara amazonica</i> (Huc.) Standl (M)**
	a ₂	<i>Hymenaea courbaril</i> L. (J)***
B (tempo de permanência no patamar final de carbonização)	b ₀	2h
	b ₁	4h

*(A) – Angelim

**(M) – Maçaranduba

*** (J) - Jatobá

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1. Densidade básica da madeira

Na tabela 16, encontram-se as médias de densidade básica da madeira, os valores mínimo e máximo, as estimativas de desvio padrão e coeficiente de variação. Nota-se que as amplitudes de variações das 3 espécies foram pequenas, bem como os coeficientes de variação.

Tabela 16. Média, amplitude de variação, desvio padrão e coeficiente de variação da densidade básica da madeira.

Espécie	Média de densidade básica (g/cm ³)	Amplitude da densidade básica (g/cm ³)		Desvio padrão (%)	Coeficiente de variação (%)
		Min.	Max.		
Angelim	0,54	0,50	0,60	0,03	4,92
Maçaranduba	0,91	0,86	0,94	0,02	2,55
Jatobá	0,78	0,77	0,80	0,01	1,43

As madeiras de Maçaranduba e Jatobá, de acordo com a SUDAM e IPT (1981), são classificadas como madeiras pesadas.

No que concerne à densidade da madeira de Angelim, constatou-se que o valor encontrado foi inferior aos citados nas literaturas para o gênero *Hymenolobium*.

Considerando que o Angelim foi identificado apenas em nível de gênero (*Hymenolobium sp.*), há a necessidade de se buscar material reprodutivo para a identificação completa da espécie.

2.4.2. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (base seca)

As médias de rendimento gravimétrico em carvão vegetal de resíduos de madeira serrada são demonstradas na tabela 17. Como se pode observar, a queda no rendimento do carvão vegetal em função do aumento do tempo de permanência no patamar final de carbonização, como já era esperada, confirma os resultados obtidos por Slocum *et al.* (1978) e Gomes e Oliveira (1980).

O motivo da redução do rendimento gravimétrico em carvão vegetal, quando se aumenta o tempo de permanência no patamar final de carbonização, pode ser explicado com base na teoria da carbonização da madeira (Gomes e Oliveira, 1980). Quanto maior o tempo no patamar final de carbonização menor será o rendimento em carvão vegetal, pois a variação do rendimento em peso do carvão vegetal tem relação direta com a quantidade de materiais volatilizados durante o processo de carbonização (Gomes e Oliveira, 1980).

O resíduo que apresentou o maior rendimento em carvão vegetal, considerando as mesmas condições de carbonização foi o de Jatobá, seguido de Angelim e finalmente por Maçaranduba. Essas variações de rendimento gravimétrico em carvão vegetal são, provavelmente, devido à particularidade de reações e quantidade dos componentes químicos dos resíduos de madeira de cada espécie. De acordo com Petroff e Doat (1978) e Beall e

Eickner (s.d.), o grau de degradação térmica da madeira está em função dos constituintes químicos, o que vem reforçar a suposição apresentada.

Vale ressaltar que esse elevado rendimento gravimétrico em carvão vegetal para temperatura nominal de 500°C é equivalente às espécies estudadas sob temperatura de 450 a 500°C por Trugilho *et al.* (1991), como são os casos de Pau Rainha (41,9%), Guariúba (38,%), Cordeiro (36,5%) e Eucalipto (38,3).

Tabela 17. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização (base seca), em %.

Temperatura final de carbonização °C	Espécie					
	Angelim		Maçaranduba		Jatobá	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em horas					
	2	4	2	4	2	4
500	41,57	39,25	40,24	36,5	44,24	42,79

De acordo com a análise de variância de rendimento gravimétrico em carvão vegetal de resíduos de madeira serrada mostrada na tabela 18, existe diferença altamente significativa entre pelo menos um par de tratamentos. Nos efeitos principais, espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização existe diferença altamente significativa. Porém, entre os efeitos interativos, espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização não existe diferença altamente significativa pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 18. Análise de variância de rendimento gravimétrico em carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	112,7069	22,5414	24,62**
Espécie	2	80,5276	40,2638	43,98**
Tempo	1	28,1755	28,1755	30,78**
Espécie x Tempo	2	4,0038	2,0019	2,19 ^{ns}
Resíduo	12	10,9851	0,9154	
Total	17	123,692		

** - Altamente significativo

^{ns} - Não significativo

O teste de significância realizado através do método de SNK ao nível de 1% de probabilidade, como pode ser observado na tabela 19, mostra que todas as espécies diferem significativamente entre si no rendimento gravimétrico em carvão vegetal de resíduos de madeira serrada.

Tabela 19. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Espécie	Média	Comparação
Angelim	40,41	A
Maçaranduba	38,37	B
Jatobá	43,52	C

2.4.3. Propriedades físicas

2.4.3.1. Densidade aparente do carvão vegetal

As médias de densidade aparente do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada encontram-se na tabela 20. O tempo de permanência no patamar final de carbonização não proporcionou um efeito significativo sobre a densidade aparente do carvão vegetal. Para os resíduos de madeira serrada de Angelim e Jatobá, a densidade sofreu um ligeiro aumento com a elevação do tempo de permanência no patamar final de carbonização, confirmando assim, os resultados encontrados por Mendes *et al.* (1982), enquanto que para os resíduos de madeira serrada de Maçaranduba houve uma diminuição.

A expectativa de se obter carvão vegetal denso a partir de madeira densa foi confirmada, vindo assim, ao encontro dos resultados obtidos por Doat e Petroff (1975). Porém, vale ressaltar que os resíduos de madeira serrada de Maçaranduba apesar de possuir a maior densidade básica da madeira, não resultou em carvão vegetal mais denso. Isto pode ter sido causado pela especificidade de reações pirolíticas de cada espécie.

Para discernir esta questão, recomenda-se a realização de trabalhos futuros comparando análise química da madeira e do seu respectivo carvão vegetal

Tabela 20. Densidade aparente do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização, em g/cm³.

Temperatura final de carbonização °C	Espécie					
	Angelim		Maçaranduba		Jatobá	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em horas					
	2	4	2	4	2	4
500	0,39	0,40	0,55	0,52	0,57	0,59

A análise de variância de densidade aparente do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada mostrada na tabela 21, revela que estatisticamente existe diferença altamente significativa entre o efeito principal espécie. Porém, entre o efeito principal tempo e entre os efeitos interativos dos fatores espécie e tempo, não existem diferenças altamente significativas pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 21. Análise de variância de densidade aparente do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em g/cm³.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	1160,267	232,0534	67,33**
Espécie	2	1139,038	569,5189	165,24**
Tempo	1	0,0474	0,0474	0,01 ^{ns}
Espécie x Tempo	2	21,182	10,591	3,07 ^{ns}
Resíduo	12	41,3592	3,4466	
Total	17	1201,626		

** - Altamente significativo

^{ns} - Não significativo

O teste de significância realizado através do método de SNK ao nível de 1% de probabilidade apresentado na tabela 22, informa que todas as espécies apresentam diferença altamente significativa entre si na densidade aparente do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada.

Tabela 22. Densidade aparente do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em g/cm³.

Espécie	Média	Comparação
Angelim	0,39	A
Maçaranduba	0,54	B
Jatobá	0,58	C

2.4.3.2. Poder calorífico superior do carvão vegetal

Na tabela 23, encontram-se as médias de poder calorífico superior do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada. Observa-se que o aumento no tempo de permanência no patamar final de carbonização causa uma elevação no poder calorífico superior do carvão vegetal, o que vem ao encontro dos resultados encontrados por Numazawa (1986).

Considerando que o poder calorífico superior tem relação com a combustão dos componentes químicos do carvão vegetal, isto sugere que o tempo de permanência no patamar final de carbonização possa ter influenciado nos teores de carbono fixo (Korobkin, 1950) e materiais voláteis (Lamaxana, s.d.), provocando essa variação no poder calorífico.

A análise química tem mostra que o carvão vegetal é fundamentalmente constituído por três elementos que são: C (carbono), H (hidrogênio) e o (Oxigênio) (Wenzl, 1970). E de acordo com Earl (1974), 1g de carbono produz cerca de 7900 calorias, e para a mesma quantidade o hidrogênio produz 34000 calorias, que, variando a quantidade desses elementos químicos no carvão vegetal, faz variar também, o seu poder calorífico superior. Por isso, que o poder calorífico superior do carvão vegetal é função direta da composição química (Numazawa, 1986).

O carvão vegetal oriundo dos resíduos de madeira serrada de Angelim, independentemente do tempo de permanência no patamar final de carbonização, apresentou as maiores médias de poder calorífico superior.

Tabela 23. Poder calorífico superior do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização, em Kj/Kg.

Temperatura final de carbonização °C	Espécie					
	Angelim		Maçaranduba		Jatobá	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em horas					
	2	4	2	4	2	4
500	30.246	32.047	28.751	29.488	28.037	31.700

Na tabela 24 estão contidos os resultados da análise de variância de poder calorífico superior do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada que mostra estatisticamente que existe diferença altamente significativa entre o efeito principal tempo de permanência no patamar final de carbonização. Mas, entre o efeito principal espécie e os efeitos interativos espécie e tempo não existe diferença altamente significativa pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 24. Análise de variância de poder calorífico superior do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em Kj/Kg.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	$0,3842031 \times 10^8$	7684062	7,41**
Espécie	2	$0,1261029 \times 10^8$	6305146	6,08 ^{ns}
Tempo	1	$0,1923100 \times 10^8$	$0,1923100 \times 10^8$	18,54**
Espécie x Tempo	2	6579012	3289506	3,17 ^{ns}
Resíduo	12	$0,1245043 \times 10^8$	1037535	
Total	17	$0,5087073 \times 10^8$		

** - Altamente significativo

^{ns} ... - Não significativo

2.4.4. Propriedades químicas (base seca)

2.4.4.1. Análise química imediata do carvão vegetal

Na tabela 25, estão os resultados da análise química imediata do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada à base seca. Observa-se que os teores de materiais voláteis e carbono fixo apresentaram uma variação significativa em função do aumento do tempo de permanência no patamar final de carbonização.

O teor de carbono fixo sofreu um aumento considerável em função do aumento do tempo de permanência no patamar final de carbonização, concordando, portanto, com os resultados encontrados por Korobkin (1950) e Numazawa (1986).

Um maior tempo de exposição ao calor provoca um maior grau de volatilização, resultando em maior quantidade de carbono fixo e, conseqüentemente, menor teor de materiais voláteis remanescentes no carvão vegetal.

Os valores de teor de materiais voláteis obtidos são equivalentes aos valores encontrados por Earl (1975), que estão entre 10% e 40%.

No tocante ao teor de cinzas, observa-se que o tempo de permanência no patamar final de carbonização não causou efeito significativo na sua variação, razão esta que pode ser explicada, considerando que a quantidade de cinzas contidas no carvão vegetal depende exclusivamente da quantidade de materiais inorgânicos existentes na madeira que lhe deu origem (Collet, 1956 e Earl, 1974).

Em geral, como pode ser observado na tabela 25, as porcentagens dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo diferem entre as espécies quando submetidas às mesmas condições de carbonização.

Tabela 25. Análise química imediata do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização (base seca), em %.

Temperatura final de carbonização °C	Composição química do carvão vegetal					
	Materiais voláteis		Cinzas		Carbono fixo	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em horas					
	2	4	2	4	2	4
Espécie: Angelim						
500	28,69	20,97	0,43	0,44	70,88	74,27
Espécie: Maçaranduba						
500	26,16	21	0,77	0,78	68,81	75,24
Espécie: Jatobá						
500	32,3	24,39	0,55	0,57	67,15	70,33

A análise de variância do teor de materiais voláteis do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, demonstrada na tabela 26, indica que estatisticamente existe diferença altamente significativa entre os efeitos principais, espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização, não existindo diferença altamente significativa entre os efeitos interativos espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização, de acordo com o teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 26. Análise de variância de teor de materiais voláteis do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	296,8797	59,3759	21,44**
Espécie	2	73,3011	36,6506	13,24**
Tempo	1	216,528	216,528	78,20**
Espécie x Tempo	2	7,0505	3,5253	1,27 ^{ns}
Resíduo	12	33,2251	2,7688	
Total	17	330,1048		

** - Altamente significativo

^{ns} - Não significativo

O teste de significância realizado através do método de SNK à 1% de probabilidade mostrado na tabela 27, revela que as espécies Angelim e Maçaranduba não apresentam diferença altamente significativa entre si, mas diferem da espécie Jatobá quanto ao teor de materiais voláteis do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada.

Tabela 27. Teor de materiais voláteis do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Espécie	Média*	Comparação
Angelim	24,83	A
Maçaranduba	23,58	A
Jatobá	28,35	B

*Medias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si.

A análise de variância do teor de cinzas do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, apresentada na tabela 28, mostra estatisticamente que existe diferença altamente significativa entre o efeito principal espécie. E entre o efeito principal tempo de permanência no patamar final de carbonização e entre os efeitos interativos espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização, não existe diferença altamente significativa pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 28. Análise de variância de teor de cinzas do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	0,3525	0,0704	19,14**
Espécie	2	0,3512	0,1756	47,68**
Tempo	1	0,0009	0,0009	0,25 ^{ns}
Espécie x Tempo	2	0,0003	0,0002	0,05 ^{ns}
Resíduo	12	0,0442	0,0037	
Total	17	0,3967		

** - Altamente significativo

^{ns} - Não significativo

O teste de significância realizado pelo método de SNK à 1% de probabilidade presente na tabela 29, mostra que todas as espécies apresentam uma diferença altamente significativa entre si, quanto ao teor de cinzas do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada.

Tabela 29. Teor de cinzas do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Espécie	Média	Comparação
Angelim	0,44	A
Maçaranduba	0,77	B
Jatobá	0,56	C

A análise de variância do teor de carbono fixo do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, contido na tabela 30, indica estatisticamente que existe diferença altamente significativa entre os efeitos principais espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização, não existindo, portanto, diferença altamente significativa entre os efeitos interativos espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 30. Análise de variância de teor de carbono fixo do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	146,0417	29,2083	9,98**
Espécie	2	51,6494	25,8247	8,82**
Tempo	1	84,4567	84,4567	28,85**
Espécie x Tempo	2	9,9356	4,9678	1,70 ^{ns}
Resíduo	12	35,1239	2,927	
Total	17	181,1656		

** - Altamente significativo

^{ns} - Não significativo

O teste de significância realizado através do método de SNK à 1% de probabilidade apresentado na tabela 31, revela que as espécies Angelim e Maçaranduba não apresentam diferença altamente significativa entre si, mas, diferem significativamente da espécie Jatobá com relação ao teor de carbono fixo do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada.

Tabela 31. Teor de carbono fixo do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Espécie	Média*	Comparação
Angelim	72,58	A
Maçaranduba	72,02	A
Jatobá	68,74	B

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

2.4.5. Propriedade mecânica (friabilidade do carvão vegetal)

Os resultados de friabilidade do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada mostrados na tabela 32, indicou que o aumento de 2 horas no tempo de permanência do patamar final de carbonização provocou um aumento na formação de finos pela ação combinada de abrasão e queda para as três espécies estudadas, porém, sendo mais significativo para o carvão vegetal de resíduos de madeira serrada de Maçaranduba e Angelim, que apresentaram respectivamente 20,4% e 19,7%. A espécie Jatobá apresenta-se mais resistente, tendo um acréscimo de apenas 2,4%.

No que concerne a porcentagem de finos formados no teste de tamboramento, o carvão vegetal de resíduos de madeira serrada de Maçaranduba é menos resistentes com média de 26,6% de finos, seguido por Jatobá com 21,1% e Angelim com 16,8%. Esses carvões vegetais são classificados, segundo o CTFT (Centre Technique Forestier Tropical) (Briane e Doat, 1985) como bastante e medianamente friáveis.

Esta propriedade evidencia ser muito específica de cada espécie. As literaturas citam que fatores como velocidade de aquecimento, os teores de umidade da madeira (Mendes *et al.*, 1982) e a temperatura de carbonização (Coutinho e Ferraz, 1988) também influenciam na resistência do carvão vegetal à formação de finos.

Tabela 32. Friabilidade do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização, em %.

Temperatura final de carbonização °C	Espécie					
	Angelim		Maçaranduba		Jatobá	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em horas					
	2	4	2	4	2	4
	500	15,26	18,26	24,13	29,04	20,86

A análise de variância de friabilidade do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada apresentada na tabela 33, mostra estatisticamente que existe diferença altamente significativa entre os efeitos principais espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização, não existindo diferença altamente significativa entre os efeitos interativos espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 33. Análise de variância de friabilidade do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	340,91	68,18	22,39**
Espécie	2	290,85	145,42	47,76**
Tempo	1	35,36	35,36	11,61**
Espécie x Tempo	2	14,69	7,35	2,41 ^{ns}
Resíduo	12	36,54	3,04	
Total	17	377,44		

** - Altamente significativo

^{ns} - Não significativo

O teste de significância realizado através do método de SNK à 1% de probabilidade apresentado na tabela 34 demonstra que todas as espécies apresentam diferença significativa entre si, na formação de finos do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada.

Tabela 34. Friabilidade do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada, em %.

Espécie	Média	Comparação
Angelim	16,76	A
Maçaranduba	26,59	B
Jatobá	21,11	C

2.4.6. Rendimento dos produtos de pirólise da madeira

Na tabela 35 estão apresentados os resultados de rendimento dos produtos de pirólise de resíduos de madeira serrada.

As análises foram feitas apenas para as frações líquida (licor pirolenhoso) e gasosa (gases incondensáveis), visto que da parte sólida, já foi demonstrada no tópico que trata do rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Constata-se que o aumento no tempo de permanência no patamar final de carbonização causou um efeito diferenciado para as espécies estudadas. Os resíduos de madeira serrada de Jatobá apresentaram o maior aumento na produção de licor pirolenhoso quando o tempo de permanência no patamar final de carbonização foi elevado por 2 horas, formando 16,9%, seguido por Angelim com 8,4%. Contrariamente, os resíduos de madeira serrada de Maçaranduba sofreu uma redução de 1% na produção de licor pirolenhoso, porém,

gerou cerca de 20,4% mais de gases. Observa-se também que esta espécie sofreu o maior grau de volatilização, resultando em menor rendimento de sólido e maior quantidade de voláteis condensáveis.

No geral, a fração gasosa é inversamente proporcional a fração líquida em função do aumento do tempo de permanência no patamar final de carbonização.

Os valores de rendimento dos produtos de pirólise de resíduos de madeira serrada não ocorreram dentro das margens esperadas, vindo a conflitar com Brito e Barrichelo (1981), que diz que os produtos condensáveis e não condensáveis variam nas faixas de 40 a 45% e 15 a 20%, respectivamente, e contrário aos resultados encontrados por Uhart (1976), Pandolfo (1977), Petroff e Doat (1978) e Trugilho *et al.* (1991). Isto pode ser explicado, certamente, se considerarmos que os autores tenham utilizado tempos de carbonização ou velocidades de aquecimento diferentes, pois, estes autores não fazem citação destes fatores.

Tabela 35. Rendimento dos produtos de pirólise de resíduos de madeira serrada em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização (base seca), em %.

Temperatura final de carbonização °C	Produto de pirólise da madeira					
	Sólido		Líquido pirolenhoso		Gás não-condensável*	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em horas					
	2	4	2	4	2	4
	Espécie: Angelim					
500	41,57	39,25	35,19	38,15	23,24	22,6
Espécie: Maçaranduba						
500	40,24	36,5	39,56	39,19	20,19	24,31
Espécie: Jatobá						
500	44,24	42,79	30,63	35,8	25,13	21,41

A análise de variância do rendimento de sólido, pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade e o teste de significância, através do teste SNK, também à 1% de probabilidade, já foi ilustrada no item 2.4.2.1.

Na tabela 36 estão contidos os resultados da análise de variância de rendimento de líquido pirolenhoso que mostram estatisticamente que existe diferença altamente significativa entre o efeito principal espécie, não existindo, portanto, diferença altamente significativa entre o efeito principal tempo e entre os efeitos interativos espécie e tempo de permanência no patamar final de carbonização pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 36. Análise de variância de rendimento de líquido pirolenhoso de resíduos de madeira serrada, em %.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	167,8805	33,5761	5,57**
Espécie	2	114,4703	57,2352	9,49**
Tempo	1	30,0329	30,0329	4,98 ^{ns}
Espécie x Tempo	2	23,3772	11,6886	1,94 ^{ns}
Resíduo	12	72,3606	6,03004	
Total	17	240,2411		

** - Altamente significativo

^{ns} - Não significativo

O teste de significância feito pelo método de SNK a 1% de probabilidade apresentado na tabela 37, indica que estatisticamente os resíduos de madeira serrada da espécie Angelim são semelhantes aos das espécies Maçaranduba e Jatobá, que diferem entre si na produção de líquido pirolenhoso.

Tabela 37. Rendimento de líquido pirolenhoso de resíduos de madeira serrada, em %.

Espécie	Média*	Comparação
Angelim	36,67	AB
Maçaranduba	39,38	A
Jatobá	33,21	B

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

A análise de variância do rendimento de gás não-condensável de resíduos de madeira serrada apresentada na tabela 38, revela estatisticamente que não existe diferença altamente significativa entre nenhum par de tratamentos, pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 38. Análise de variância de rendimento de gás não-condensável de resíduos de madeira serrada, em %.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	49,9691	9,9938	1,52 ^{ns}
Espécie	2	3,2159	1,608	0,24 ^{ns}
Tempo	1	0,0296	0,2994	0,00 ^{ns}
Espécie x Tempo	2	46,7236	23,3618	3,55 ^{ns}
Resíduo	12	79,0268	6,5856	
Total	17	128,9959		

^{ns} - Não significativo

2.5. CONCLUSÕES

- O tempo de permanência no patamar final de carbonização é um fator que estatisticamente influencia em todas as propriedades do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), com exceção sobre a densidade e o teor de cinzas.

- Para as condições operacionais de carbonização a nível de laboratório, os resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) são muito promissores para produção de carvão vegetal, podendo se obter elevado rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

- Os carvões vegetais de resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) têm qualidade excepcional de elevada densidade, podendo ser indicado para uso em que se requer grande quantidade de massa por unidade de volume.

- O carvão vegetal de resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), apesar de ter menor densidade, equivale ao carvão vegetal de Eucalipto, tradicionalmente o mais utilizado no país.

- A característica energética dos carvões vegetais de resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) é compatível com a dos carvões vegetais de outras espécies carbonizadas sob as mesmas condições operacionais.

- Os teores de carbono fixo e materiais voláteis dos carvões vegetais de resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) não são compatíveis com a temperatura nominal de 500°C, indicando provavelmente que, a temperatura no interior do cilindro de carbonização, onde ocorre a conversão, foi menor que a do forno.

- A alta friabilidade do carvão vegetal de resíduos de madeira serrada de *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) não permite que o produto seja transportado a longas distâncias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M.R. 1982. Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria. In: CETEC. *Produção e utilização de carvão vegetal*. Belo Horizonte. p.173-180 (SPT-008)
- Baileys, R.T.; Blankenhorn, P.R. 1982 Calorific and porosity development in carbonized wood. *Wood Science*, 15(1):19-28
- Beal, F.C.; Blankenhorn, P.R.; Moore, G.E. 1974. Carbonized wood physical properties and as sem preparation. *Wood Science*, 6(3):212-219
- Beall, F.C.; Eickner, H.W. s.d. *Thermal degradation of wood components; a review of the literature*. S.I., Forest Products Laboratory, Forest Service, US Departament of Agriculture. 22p.
- Blankenhorn, P.R.; Barnes, D.P.; Kline, D.E.; Murphey, W.K 1978. Porosity and pore size distribution of black cherry carbonized in na inert atmosphere. *Wood Science*, 11(1):23-29
- Brito, J.O.; Barrichelo, L.E. 1981. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. *IPEF*, 14:1-25
- Briane, D.; Doat, J. 1985. *Guide technique de la carbonisation. La fabrication du carbon de bois*. Agence Française pour la maîtrise de L'énergie. Association bois de feu. Centre Technique Forestier Tropical. Édisup. 32p.
- Charles, E. 1982. La distillation moderne du bois. *Chimie & Industrie*, 67(1):56-62

- Collet, F. 1956. Estudo comparativo em escala laboratorial de diversas madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal. *ABM*, 12(42):5-14
- Corrêa, A. de A. 1988. Conversão química de madeiras da Amazônia – carvão e brinquetes de carvão vegetal. *Acta Amazonica*, 18 (1-2):93–108
- Coutinho, A.R.; Ferraz, E.S.B. 1988. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. *IPEF*, (38):33-50
- Doat, J.; Petroff, G. 1975. La carbozination des bois tropicaux. *Revue Bois et des Tropique*, 159:55–72
- Earl, D.E. 1974. Charcoal. In: Mayer, A. (ed.) *Research Fellow*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. 97p.
- Earl, D.E. 1975. Informe sobre el carbone vegetal. In: Mayer, A. (ed.) *Research Fellow*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. p.5
- FAO. 1983. *Simple technologies for charcoal making*. FAO, Roma. 41p. (Forestry paper n. 15).
- Goldstein, I.S. 1978. Wood as a source of chemical feedstocks. *AIChE Symposium series*, 74(177):111-114
- Gomes, P.A.; Oliveira, J.B. 1980. Teoria de carbonização da madeira. In: CETEC. *Uso da madeira para fins energéticos*. CETEC, Belo Horizonte. p.27 – 41 (SPT – 001).
- Harris, A.C. 1978 Charcoal production. *Eighth World Forestry Congress*. Fakarta. p.16-28
- Humphreys, G.E. 1980. *Ironside*. Forestry Commission of the New South Wales. 3^a ed. Research note:44
- Kanvry, A.M. Blackshear, P.L. 1970. Some considerations pertaining to the problem of wood burning. *Combustion Science and technology*, 1(2):12-18
- Karchesy, J.; Koch, P. 1979. *Energy production from hardwood growing on southern pines sites*. U. S. Department Report SO-24. Southern Forest Experiment Station. New Orleans.
- Korobkin, V.A. 1950. Optimum temperature of carbonization of wood. *Stal Maskva* 8, 1948 (487 – 494) (RUN) *Chemical Abstrat*, 44:3
- Krila, J.M. 1980. Characteristics of carbonized wood affected by extration. *Wood Science*, 13(1):18-25
- Lamaxana, N.B. s.d. Proximate chemical analyses of charcaol from some philippines woods. *Forpride Dige*, 7(213):48–53

- Mendes, M.G.; Gomes, P.A.; Almeida, M.R. 1982. Propriedades do carvão vegetal. In: CETEC. *Produção e Utilização de Carvão Vegetal*. CETEC, Belo Horizonte. p.75-89 (SPT - 008).
- Nanassy, A.J.; Fung, D.P.C. 1975. Pyrolyses of wood studied by E.S.R. *Wood Science*, 7(3):232-239
- Numazawa, S. 1986. *Aproveitamento de resíduos da exploração florestal em Curua-Uma/Pa, para produção de carvão vegetal*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 126p.
- Oliveira, J.B.; Almeida, M.R. 1980. Avaliação de carvão vegetal. In: CETEC. *Uso da Madeira para Fins Energéticos*. CETEC, Belo Horizonte. p.43-53 (SPT - 001).
- Oliveira, J.B.; Vivacqua Filho, A.; Mendes, M.G.; Gomes, P.A. 1982a. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In: CETEC. *Produção e Utilização de Carvão Vegetal*. CETEC, Belo Horizonte. p.59-72 (SPT - 008).
- Oliveira, J.B.; Gomes, P.A.; Almeida, M.R. 1982b. Propriedades do carvão vegetal. In: CETEC. *Carvão Vegetal*. CETEC, Belo Horizonte. p.39-62 (SPT - 006).
- Pandolfo, C. 1977. Floresta amazônica no contexto energético brasileiro. *Silvicultura*, (Ed. esp.):113 -121
- Petroff, G.; Doat, J. 1978. Pirolise des bois tropicaux - Influence de la composition chimique de bois sur les produits de distillation. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, 177:51-64
- Satonaka, S. 1982. Carbonization and Gaseification of Wood. Energy from forest biomass. Ed. By W. Ransay Smith College of Forests Resources. University of Washington, Seattle. Washington. *XVII-IUFRO World Congress Energy Group Proceeding*. Academic Press. p.147-154
- Slocum, D.H.; Mggines Jr., E.A.; Beall, F.C. 1978. Charcoal yield shrinkage and density changes during carbonization of oak and hictory woods. *Wood Science*, 11(1):42-47
- Steel, R.G.; Torrie, J.H. 1960. *Principles and Procedures of Statistics*. New York. McGAW-Hill Book Company. 481p.
- SUDAM; IPT. 1981. *Grupamento de espécies tropicais da Amazônia por similaridade de características básicas e por utilização*. Departamento de Recursos Naturais. Centro de Tecnologia Madeireira, Belém. 237p.
- Thomas, R.J. 1977. Wood: structure and chemical composition. In: Goldstein, I.S., ed. *Wood technology:chemical aspects*. Whashington, ACP.p.1-23
- Trugilho, P.F.; Silva, D.A da; Frazão, F.J.L.; Regazzi, A.J. 1991. Caracterização de espécies nativas e exóticas amazônicas e do carvão vegetal. *Revista árvore*, 15(2):144-151
- Uhart, E. 1976. *A floresta amazônica: fonte de energia*. SUDAM, Belém. 114 p.

- Valente, O.F.; Almeida, J.M.de; Vital, B.R.; Lucia, R.M.D. 1985. Efeito da temperatura de carbonização nos rendimentos e propriedades do carvão vegetal produzido. *Revista Árvore*, 9(1):28-39
- Veado, J.T.; Abdala, E.; Fernandez, M. de P.; Klingl, O. 1977. Tecnologia avançada para produção de carvão vegetal. *Metalúrgica. ABM*, 33(239)596-603
- Verrísimo, A.; Lima, E.; Lentini, M. 2002. Pólos Madeireiros do estado do Pará. IMAZON, Belém. 72p.
- Wenzl, H.F.J. 1970. *The chemical technology of wood*. New York Academic Press, New York. 692p.

CAPITULO 3

POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DA MADEIRA DE *Hymenolobium* sp., *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl E *Hymenaea courbaril* L. CONVERTÍVEL EM CARVÃO VEGETAL NO ESTADO DO PARÁ

RESUMO

Devido a maior parte da matéria prima para produzir carvão vegetal, no Estado do Pará, ser proveniente de florestas naturais, fez-se necessário o estudo de potencialidade energética dos resíduos de processamento primário da madeira convertível em carvão vegetal, das seguintes espécies: *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazônica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), tendo como objetivo avaliar o potencial energético da madeira das espécies e estimar a redução de área de floresta explorada e plantada, por ano no Estado do Pará. A potencialidade energética da madeira convertível em carvão vegetal foi determinada para os carvões vegetais obtidos nos tempos de permanência no patamar final de carbonização de 2 e 4 horas a 500°C num delineamento experimental completamente ao acaso, em arranjos fatoriais de 3 x 2, com 3 repetições. Para a espécie Angelim, constatou-se que o aumento no tempo de permanência no patamar final de carbonização, praticamente não causou efeito sobre a potencialidade energética. No entanto, para Jatobá e Maçaranduba a variação foi importante, sendo que, para a primeira espécie o efeito foi positivo com um aumento de 1.161Kj/Kg, enquanto que para a segunda foi negativo, tendo uma redução de 806Kj/Kg. A quantidade de resíduos de madeira serrada das três espécies estudadas por ano no Estado do Pará, equivale a 15.075ha/ano em capoeira enriquecida e 7.065ha/ano de floresta plantada.

Palavras-chave: Madeiras; Energia; Resíduos e Biomassa.

ENERGY POTENTIALITY OF THE RESIDUES OF PRIMARY PROCESSING OF THE WOOD OF THE *Hymenolobium* sp., *Manilkara amazônica* (Huc.) Standl AND *Hymenaea courbaril* L. TURNED INTO CHARCOAL IN THE STATE OF PARÁ

ABSTRACT

Due to the origin of most of the wood used to produce charcoal, in the State of Pará, that is, it comes from natural forests, it was necessary to conduct the study of energy potentiality of the residues of primary processing of the wood turned into charcoal, the following species: *Hymenolobium* sp (Angelim), *Manilkara amazonica* (Ducke) Stland (Maçaranduba) and *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), it has as objective to evaluate the energy potential of the wood of the species and calculate the reduction of the area of the explored and planted forest, every year in the State of Pará. The energy potentiality of the wood turned into charcoal was determined for the charcoal obtained in the time of permanence in the final level of carbonization of 2 and 4 hours for 500°C in an outline made at random, in factual arrangements of 3 x 2, with 3 repetitions. For the specie Angelim, it was verified that the increase in the time of permanence in the final level of carbonization, practically it didn't cause effect on the energy potentiality. However, for Jatobá and Maçaranduba the variation was important, that is, for the first specie the effect was positive with an increase of 1.161Kj/Kg, while for the other one it was negative, it had a reduction of 806Kj/Kg. The amount of residues of sawed wood of the three studied species every year in the State of Pará, it is equal for 15.075 ha/year in enriched vegetation and 7.065ha/year of planted forest.

Key-words: Wood; Energy; Residues and Biomass.

3.1. INTRODUÇÃO

Na região amazônica, a maior parte da matéria-prima utilizada para produzir carvão vegetal é proveniente de florestas nativas, prática esta ilegal, mas bastante comum. Esta atitude inadequada tem sido uma das causas do aumento de áreas devastadas no Estado do Pará, em particular.

As indústrias madeireiras da Amazônia extraem cerca de 350 espécies (Martini *et al.*, 1994). E no caso específico do Estado do Pará, as espécies mais exploradas são: Ipê (*Tabebuia* sp), Cedro (*Cedrela odorata*), Freijó (*Cordia* sp.), Maçaranduba (*Manilkara* sp.), Angelim pedra (*Hymenolobium* sp.), Angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), Jatobá (*Hymenaea* sp), Louro (*Nectandra* sp), Muiracatiara (*Astronium* sp), Tauari (*Couratari* sp), Faveira (*Pterodon* sp), Cumaru (*Dipteryx* sp), Piquiá (*Caryocar* sp), Tatajuba (*Bagassa guianensis*) e Marupa (*Simaruba amara*) (Veríssimo *et al.*, 2002). Sabendo-se o Pará conter um grande número de indústrias madeireiras (serrarias), sendo o Estado com maior número de indústrias, depois de Mato Grosso, portanto, altamente potencial na geração de resíduos de madeira (aparas e costaneiras) promissoras em termos energéticos, torna-se uma alternativa de “Uso Sustentável de Recursos Naturais”, utilizá-los para produzir carvão vegetal para fins siderúrgicos, pois se espera, que seja reduzida a exploração das florestas tropicais, para fins energéticos.

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial energético dos resíduos de madeira das espécies *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazônica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), comparando-os com a biomassa seca de diversos tipos de florestas natural e plantada para estimar a redução das respectivas áreas para produzir carvão vegetal.

3.2. REVISÃO DE LITERATURA

3.2.1. Biomassa vegetal e sua potencialidade energética

3.2.1.1. Potencialidade energética da madeira

Segundo Zoelling (1994), um quilo de madeira seca contém cerca de 8.000 à 9.000 BTU, concluindo-se por indução que 1,7Kg está para 1 litro de óleo combustível. O sucesso da utilização da madeira como fonte geradora de energia está relacionado à facilidade com que a madeira entra em combustão, podendo-se obter um valor médio de 9.000 e 8.300 BTU/lb para o poder calorífico de madeiras secas resinosas e não resinosas, respectivamente.

De acordo com documento da FAO (1990), mais de dois terços das populações dos países em desenvolvimento dependem essencialmente da lenha para suprir suas necessidades de energia para uso doméstico. Este seguimento representa, atualmente, cerca de 20-22% do consumo final de energia no Brasil, existindo base factual para afirmar que é técnica e economicamente viável elevar este potencial para 40% (Goldemberg, 1998).

3.2.1.2. *Florestas e sua potencialidade*

De toda a biomassa florestal produzida na região amazônica, cerca de 49% é explorada para ser utilizada como lenha para produção de carvão vegetal, somente 10% chegam às serrarias e o restante é descartado como resíduo florestal (Reis, 1989).

Em 1993, a área estimada de florestas plantadas para produção de lenha no Brasil era de 6,5 milhões de hectares, representada por 52% em plantação de Eucalypto, 30% em Pinus, e o restante, de outras espécies, onde o principal uso é na indústria siderúrgica (Goldemberg, 1998).

Com base em valores encontrados em literaturas (Tabela 39), para florestas de várzea, terra firme, capoeira enriquecida (idade média de 26 meses) e para floresta de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (espaçamento de 1,5 x 1,0m, com 39 meses idade), os valores médios de biomassa seca para esses tipos de cobertura vegetal são de: 242,5ton./ha, 334ton./ha e 70,4ton./ha, respectivamente

Tabela 39. Valores médios de Biomassa Seca (BS) de Floresta de Várzea (FV), Floresta de Terra Firme (FTF), Capoeira Enriquecida (CE), na Amazônia e de Floresta Plantada (FP) de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden com espaçamento de 1,5 x 1,0m.

BS (ton./ha)	Nível da amostra	Tipo de floresta	Local	Fonte
178	DAP>5cm	FV	Amazonas	Klinge <i>et al.</i> (1995)
307	DAP>5cm	FV	Abaetetuba-PA	Tsuchiya e Hiraoka (1999)
300	DAP>10 cm	FTF	Paragominas-PA	Uhl <i>et al.</i> (1988)
320	DAP>10 cm	FTF	Acre	Brown <i>et al.</i> (1992)
250	DAP>10 cm	FTF	Peixe-boi-PA	Salomão (1994)
285	DAP>10 cm	FTF	Rondônia	Brown <i>et al.</i> (1995)
515	DAP>10 cm	FTF	Tomé-açu-PA	Araújo <i>et al.</i> (1999)
48	28 meses	CE	Rondônia	Rodrigues <i>et al.</i> (1998)
22	30 meses	CE	Igarapé-açu-PA	Brienza Jr. (1999)
29	21 meses	CE	Paragominas-PA	Pereira (2001)
70,69	39 meses	FP	Minas Gerais	Rezende (1981)
61,68	39 meses	FP	Minas Gerais	Rezende (1981)
78,86	39 meses	FP	Minas Gerais	Rezende (1981)

Nota-se que a quantidade de biomassa por unidade de área varia muito para o mesmo tipo de floresta, provavelmente, em função das características ambientais (clima, solo, precipitação pluviométrica, etc.) específicas de cada área e também da idade, que determina a produção dessa biomassa.

3.2.1.3. Resíduos de madeira serrada e sua potencialidade

A madeira serrada constitui o item mais importante em termos de volume comercializado. O Pará é 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 (PNUD, 2000).

Em 1998, no Estado do Pará, o consumo médio anual de madeira em tora por categoria de porte de empresa (serraria) foi de: 1.300 metros cúbicos em microempresa; 7.700 metros cúbicos em empresa pequena; 14.500 metros cúbicos em empresa de porte médio e 28.000 metros cúbicos em empresa de grande porte (Veríssimo *et al.*, 2002). Observa-se que o

Pará pode ser considerado um pólo potencial na geração de resíduos de madeira serrada para produção de carvão vegetal.

Nas serrarias, o rendimento volumétrico da produção de madeira serrada varia de 40 a 65% da tora, ou seja, quase a metade transforma-se em resíduos, conforme as toras, as espécies e tecnologia de corte empregada (SUDAM, 1979; Revista Brasil Madeira, 1980; SUDAM, 1981; Carré *et al.*, 1992; Vidal *et al.*, 1997; Veríssimo *et al.*, 2002). onde seu aproveitamento 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 (Barbosa *et al.*, 2001), pois, uma vez que, utiliza-se uma alternativa de matéria-prima que já se encontra disponível em abundância que supera a sua procura, a pressão sobre as florestas é reduzida e os seus recursos são otimizados.

3.2.2. Fatores que influenciam na potencialidade energética da madeira convertível em carvão vegetal

A potencialidade energética da madeira convertível em carvão vegetal sofre influência do fator temperatura, visto que esta é baseada no rendimento gravimétrico em carvão vegetal e no poder calorífico, os quais variam sensivelmente com a temperatura de carbonização.

Numazawa (1986), ao estudar as espécies Maçaranduba, Angelim e Cupiúba a 400°C, 600°C e 800°C, determinou que quanto maior a temperatura menor será a potencialidade energética da madeira convertível em carvão vegetal, seguindo a mesma tendência do rendimento gravimétrico em carvão vegetal do qual depende fundamentalmente a potencialidade energética da madeira.

Esse mesmo autor cita que o tempo de carbonização é um fator que exerce influência sobre a potencialidade energética da madeira, como foi observado com as espécies anteriormente citadas, que sofreram um decréscimo na potencialidade energética ao se aumentar o tempo de permanência no patamar final de carbonização de 10 para 30 minutos.

3.3. MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1. Local de origem dos resíduos de madeira serrada

A área de coleta do material de estudo está descrita no item 2.3.1. do Capítulo 2.

3.3.2. Seleção das espécies

Neste estudo, foram adotadas as mesmas espécies citadas no item 2.3.2. do Capítulo 2.

3.3.3. Potencialidade energética dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal

A potencialidade energética por unidade de massa de resíduos de madeira serrada convertível em carvão foi determinada com base em três parâmetros: Massa de madeira seca; Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (base seca) e Poder calorífico superior do carvão vegetal, através da equação 9.

$$PER = MAD \times RG_{(b.s.)} \times PCS \quad \text{[Equação 9]}$$

Onde,

PER – Potencialidade energética por unidade de massa de resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, em Kj/Kg;

MAD - 1 quilo de madeira seca.

$RG_{(b.s.)}$ – Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (base seca), em %.

PCS – Poder calorífico superior do carvão vegetal, em Kj/Kg.

A PER das espécies estudadas serviu para calcular a potencialidade energética anual dos resíduos de madeira serrada gerados no Estado do Pará, convertível em carvão vegetal, utilizando-se a equação 10.

$$PEAR = a \times b \times PER \quad \text{[Equação 10]}$$

Onde,

PEAR – Potencialidade energética anual dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão, em Kj/ano.

- a- Volume de resíduos de madeira serrada para produção de carvão vegetal, em m^3/ano .
- b - Densidade básica da madeira, em Kg/m^3 .
- PER - Potencialidade energética dos resíduos por unidade de massa de madeira serrada convertível em carvão vegetal, em Kj/Kg .

Para este estudo foram utilizados os valores de densidade básica da madeira, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e poder calorífico superior do carvão vegetal, descritos no Capítulo 2, nos itens 2.3.4, 2.3.5.3 e 2.3.6.1.2, respectivamente.

3.3.4. Análise estatística

As variáveis de resposta foram analisadas da mesma forma descrita no Capítulo 2, item 2.3.7.

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1. Potencialidade energética dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal

Na tabela 40, encontram-se os valores da potencialidade energética por unidade de massa dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal. Constatou-se que, para os resíduos de madeira de Jatobá convertível em carvão vegetal, o fator tempo de permanência no patamar final de carbonização causou um efeito positivo, promovendo um aumento médio de potencialidade energética da ordem de $1.161Kj/Kg$, enquanto que para os resíduos de madeira de Maçaranduba convertível em carvão vegetal esse efeito foi negativo, causando uma redução média de $806Kj/Kg$. Finalmente, para os resíduos de madeira de Angelim convertível em carvão vegetal a variação ocorrida foi insignificante.

Fica muito evidente que cada espécie sofre uma decomposição termoquímica peculiar, o que faz diferenciar uma da outra, provocando assim, a variação de rendimento, a composição química e o poder calorífico, parâmetros que influenciam na capacidade

energética do carvão vegetal e, conseqüentemente, na potencialidade energética dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal.

Para os resíduos de madeira serrada de Maçaranduba convertível em carvão vegetal, os valores de potencialidade energética são próximos dos resultados de Numazawa (1986), que obteve para o mesmo gênero carbonizado entre 400 a 600°C, os valores de potencialidade variando de 10.618Kj/Kg a 13.277Kj/Kg.

Tabela 40. Potencialidade energética por unidade de massa de resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal em diferentes tempos de permanência no patamar final de carbonização, em Kj/Kg.

Temperatura final de carbonização °C	Espécie					
	Angelim		Maçaranduba		Jatobá	
	Tempo de permanência no patamar final de carbonização em horas					
	2	4	2	4	2	4
500	12.573	12.578	11.569	10.763	12.404	13.565

Na tabela 41, são mostrados os resultados da análise de variância de potencialidade energética por unidade de massa dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal. Estatisticamente existe diferença altamente significativa entre o efeito principal espécie, pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 41. Análise de variância de potencialidade energética por unidade de massa de resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, em Kj/Kg.

Fontes de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamentos	5	9175793	1835159	8,86**
Espécie	2	6812560	3406280	16,45**
Tempo	1	252656,6	252656,6	1,22 ^{ns}
Espécie x Tempo	2	2110577	1055288	5,10 ^{ns}
Resíduo	12	2484846	207070.5	
Total	17	0,1166064 x 10⁸		

** - Altamente significativo

^{ns} - Não significativo

O teste de significância realizado através do método de SNK ao nível de 1% de probabilidade apresentado na tabela 42, demonstra que entre as espécies Angelim e Jatobá estatisticamente não existe diferença altamente significativa, mas diferem da Maçaranduba, na potencialidade energética por unidade de massa de resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal.

Tabela 42. Potencialidade energética por unidade de massa de resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, Kj/Kg.

Espécie	Média*	Comparação
Angelim	12.572,95	A
Maçaranduba	11.520,23	B
Jatobá	12.980,39	A

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

Na tabela 43, verifica-se que a espécie que gerou maior volume de resíduos de madeira serrada (aparas e costaneiras) foi a Maçaranduba ($225.352\text{m}^3/\text{ano}$), seguida de Angelim ($215.398\text{m}^3/\text{ano}$) e Jatobá ($200.863\text{m}^3/\text{ano}$), determinado com base no volume total das madeiras extraídas, segundo Veríssimo *et al.* (2002) e na porcentagem de participação dessas espécies no mercado (PNUD, 2000).

Quanto a potencialidade energética dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal por ano, vale ressaltar que a Maçaranduba foi o destaque, apresentando o maior potencial de energia com uma variação de $2,3725 \times 10^{12}$ a $2,2072 \times 10^{12}\text{Kj/ano}$, seguida por Jatobá com $1,9431 \times 10^{12}$ a $2,1249 \times 10^{12}\text{Kj/ano}$ e finalmente por Angelim com $1,4625 \times 10^{12}$ a $1,4631 \times 10^{12}\text{Kj/ano}$. Isto fica evidente que o fator que causa o maior efeito sobre a potencialidade energética foi a quantidade de massa dos resíduos gerados durante o ano, uma vez que a Maçaranduba, apesar de possuir a menor capacidade energética, foi a espécie que se destacou com maior potencial de energia produzível.

Tabela 43. Estimativa da potencialidade energética anual (kjoule) dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, no Estado do Pará.

(1) Volume anual de toras de madeiras, em m ³ .		(2) Volume anual de resíduos por espécie, em m ³ .	(3) Volume anual de resíduos/especie para carvão vegetal, em m ³ . (A)	Potencialidade energética dos resíduos por unidade de massa de madeira serrada convertível em carvão vegetal, em Kj/Kg.(B)		Potencialidade energética dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, em Kj/ano. (A x B ₁ e 2 x C _{1, 2 e 3})	
				Tempo de permanência no patamar final de carbonização em horas			
				2 (B ₁)	4 (B ₂)	2 (B ₁)	4 (B ₂)
Espécie: Angelim				Densidade básica da madeira: 540 Kg/m ³ (C ₁)			
917.150	351.268	215.398		12.573	12.578	1,4625 x 10 ¹²	1,4631 x 10 ¹²
Espécie: Maçaranduba				Densidade básica da madeira: 910 Kg/m ³ (C ₂)			
762.450	367.501	225.352		11.569	10.763	2,3725 x 10 ¹²	2,2072 x 10 ¹²
Espécie: Jatobá				Densidade básica da madeira: 780 Kg/m ³ (C ₃)			
663.000	327.522	200.836		12.404	13.565	1,94307 x 10 ¹²	2,1249 x 10 ¹²

(1) Baseado no volume total de madeira comercializada no ano de 2002, no Estado do Pará (11,05 milhões de m³, segundo Veríssimo *et al.* (2002) e na porcentagem de participação de cada espécie no mercado (Angelim - 8,3%; Maçaranduba - 6,9%; e Jatobá - 6,0%, segundo o PNUD (2000)).

(2) Rendimento total de resíduos de madeira serrada (Angelim - 38,3%; Maçaranduba - 48,2% e Jatobá - 49,4%) segundo a SUDAM (1981).

(3) Resíduos de madeira aproveitáveis para produção de carvão vegetal, calculado com base na soma de aparas e costaneiras, correspondem a 61,32% do volume total de resíduos, segundo Carré *et al.* (1992).

Na tabela 44, é mostrado o potencial anual de produção de carvão vegetal a partir de resíduos de madeira de serrarias no Estado do Pará e a sua equivalência em Tonelada Equivalente Petróleo – TEP.

O aproveitamento de resíduos de processamento primário da madeira das espécies estudadas para produção de carvão vegetal, independentemente do tempo de permanência no patamar final de carbonização representa em média: Maçaranduba (78.686ton./ano), Jatobá (60.168ton./ano) e Angelim (47.003ton./ano), que somados chegam a equivaler cerca de 19,4% do consumo anual de carvão vegetal, como redutor de minérios, dos Estados do Pará e Maranhão, que é de aproximadamente 1 milhão de toneladas.

Com base na relação: 1TEP=1,59 tonelada de carvão vegetal (Briane e Doat, 1985), o uso de resíduos de madeira serrada das espécies Angelim, Maçaranduba e Jatobá equivaleria a um potencial entre 47.076 e 51.899 TEP/ano para Maçaranduba, 42.158 e 43.587 TEP/ano para Jatobá e 28.713 e 30.140 TEP/ano para Angelim.

Tabela 44. Relação entre a potencialidade energética anual dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, quantidade de carvão vegetal e Tonelada Equivalente Petróleo por ano.

Potencialidade energética anual dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal, em Kj/ano.		Quantidade de carvão vegetal por ano, ton./ano*.		Tonelada Equivalente Petróleo – TEP por ano (1 TEP = 1,59 tonelada de carvão vegetal) (Briane e Doat, 1985)	
Tempo de permanência no patamar final de carbonização em horas					
2	4	2	4	2	4
Espécie: Angelim					
1,4625 x 10 ¹²	1,4631 x 10 ¹²	48.352	45.654	30.410	28.713
Espécie: Maçaranduba					
2,3725 x 10 ¹²	2,2072 x 10 ¹²	82.520	74.852	51.899	47.076
Espécie: Jatobá					
1,94307 x 10 ¹²	2,1249 x 10 ¹²	69.303	67.032	43.587	42.158

*Obtido pelo produto entre potencialidade energética anual dos resíduos de madeira serrada convertível em carvão vegetal (Kj/ano) e poder calorífico superior do carvão vegetal (Kj/Kg).

3.4.2. Equivalência dos resíduos de madeira serrada em áreas de floresta natural e plantada

Na tabela 45 estão apresentados os valores de biomassa seca dos resíduos de madeira serrada e de diversos tipos de cobertura vegetal.

Observa-se que a Maçaranduba é a espécie que apresenta uma maior quantidade de biomassa seca de resíduos de madeira serrada por ano no Estado do Pará, principalmente por ser a espécie mais processada nas serrarias (PNUD, 2002), seguida de Jatobá e Angelim. A Maçaranduba representa 30,9% a mais de biomassa seca de resíduos de madeira serrada do que Jatobá, e esta 15,4% a mais que o Angelim.

Dos tipos de coberturas vegetais consideradas nesse estudo comparativo, a floresta de terra firme na região amazônica produz mais biomassa por hectare, devido provavelmente, às suas características ambientais peculiares mais favoráveis à ocorrência de uma diversidade e quantidade de espécies vegetais. A biomassa seca de florestas de terra firme chega a 96,6% da soma total de biomassa seca produzida dos outros tipos de cobertura (floresta de várzea, capoeira enriquecida e floresta plantada).

Tabela 45. Biomassa seca de resíduos de madeira serrada por espécie, em ton./ano e de diversos tipos de cobertura vegetal, em ton./ha.

Biomassa seca						
Espécie (ton./ano)			Tipo de cobertura vegetal (ton./ha)			
Angelim	Maçaranduba	Jatobá	FTF*	FV**	CE***	FP****
135.755	205.070	156.652	334	242,5	33	70,41

FTF – Floresta de Terra Firme, FV – Floresta de Várzea, CE – Capoeira Enriquecida e FP – Floresta Plantada.

* Média dos valores encontrados por Uhl *et al.* (1988), Brown *et al.*, (1992), Salomão (1994), Brown *et al.*, (1995) e Araújo *et al.*, (1999) para florestas de terra firme, considerando todos os indivíduos com DAP > 10cm.

** Média dos valores encontrados por Klinge *et al.* (1995) e Tsuchiya e Hiraoka (1999) para florestas de várzea, considerando todos os indivíduos com DAP > 5cm.

*** Média dos valores encontrados por Rodrigues *et al.*, (1998), Brienza Jr. (1999) e Pereira (2001) para capoeiras enriquecidas com idade média de 26 meses.

**** Média dos valores encontrados por Rezende (1981) para florestas plantadas de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden, com espaçamento de 1,5 x 1,0m.

De acordo com a tabela 46, o aproveitamento de resíduos de madeira serrada das espécies Angelim, Maçaranduba e Jatobá para produzir carvão vegetal corresponde aproximadamente a uma área de 1.489ha/ano de floresta de terra firme, 2.052ha/ano de floresta de várzea, 15.015 ha/ano de capoeira enriquecida com idade média de 26 meses e 7.065ha/ano de floresta plantada de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden com espaçamento de 1,5 x 1,0m e 36 meses de idade para fins energéticos de uso em siderurgias e metalurgias.

Como já era esperado, a Maçaranduba e o Jatobá foram as espécies com maiores equivalências em área para todos os tipos de floresta.

Os resíduos de madeira serrada por espécie, equivalem por ano a uma área maior em capoeira enriquecida, seguida de floresta plantada, devido à quantidade de biomassa seca por hectare ser menor nesses tipos de cobertura vegetal.

Tabela 46. Equivalência dos resíduos de madeira serrada em área de diversos tipos de cobertura vegetal, em ha/ano.

Espécie	Tipo de cobertura vegetal			
	Floresta de terra firme (indivíduos com DAP > 10cm)	Floresta de várzea (indivíduos com DAP > 5cm)	Capoeira enriquecida (idade média de 26 meses)	Floresta plantada de <i>Eucalyptus grandis</i> W.Hill ex Maiden (idade de 36 meses, com espaçamento de 1,5 x 1,0m)
Angelim	406	560	4.114	1.928
Maçaranduba	614	846	6.214	2.912
Jatobá	469	646	4.747	2.225
Total	1.489	2.052	15.075	7.065

3.5. CONCLUSÕES

- O tempo de permanência no patamar final de carbonização estatisticamente não influencia na potencialidade energética dos resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), convertível em carvão vegetal.

- A potencialidade energética dos resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) por ano no Estado do Pará é basicamente influenciada pela quantidade de resíduos gerados nas serrarias, que têm relação direta com a quantidade de toras serradas.
- O uso de resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) como matéria-prima para produção de carvão vegetal promove uma redução na exploração das florestas naturais de forma decrescente: capoeira enriquecida com idade média de 26 meses (15.075ha/ano), floresta de várzea (2.052ha/ano), e floresta de terra firme (1.489ha/ano).
- Para as siderúrgicas, o uso de resíduos de madeira serrada de *Hymenolobium* sp. (Angelim), *Manilkara amazonica* (Huc.) Standl (Maçaranduba) e *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) para produção de carvão representa uma redução em torno de 7.065 ha/ano de floresta plantada de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden com espaçamento de 1,5 x 1,0m e 36 meses de idade.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araujo, T.M.; Higuchi, N.; Carvalho Jr., J.A. 1999. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará, Brasil. *Forest Ecology and Management*, 117:45-52
- Barbosa, A.P., Vianez, B.F, Varejão, M. de J.; Abreu, R.L.S. de. 2001. *Considerações sobre o perfil tecnológico do setor madeireiro na Amazônia Central*. Universidade de São Paulo, São Paulo. 47p.
- Bernadin, Y.; Matos, R. 1997. *Etude de faisabilité au Brésil, par l'Antenne ERAI de San Paulo – BRESIL*. Agence Française pour la maîtrise de L'énergie. Association bois de feu. Centre Technique Forestier Tropical. Édisup. 38p.
- Briane, D.; Doat, J. 1985. *Guide technique de la carbonisation. La fabrication du carbon de bois*. Agence Française pour la maîtrise de L'énergie. Association bois de feu. Centre Technique Forestier Tropical. Édisup. 32p.
- Brienza Jr., S. 1999. *Biomass dynamics of fallow vegetation enriched with leguminous trees in eastern amazon of Brazil*. Ph D Thesis, University of Gottinger, Germany. 139p.

- Brown, I.F.; Nepstad, D.C.; Pires, I.; Luz, L.; Alechandre, A. 1992. Carbon storage and land-use in extractive reserves, Acre, Brazil. *Environmental Conservation*, 19(4):307-315
- Brown, I.F.; Martinelli, L.A.; Thomas, W.W.; Moreira, M.Z.; Ferreira, C.A.C.; Victoria, R.L. 1995. Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: example from Rondônia Brazil. *Forest Ecology and Management*, 75:175-189
- Carré, J.; Lacrosse, L.; Schenkel, Y. 1992. Relation Between Biomass Characteristics and Energy Systems. 7e Conférence Feisap Manila 34p.
- FAO. 1990. Plano de ação florestal tropical. 32p.
- Goldemberg, J. 1998. *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Universidade de São Paulo. São Paulo. 48p.
- Klinge, H.; Adis, J.; Worbes, M. 1995. The vegetation of a seasonal varzea forest in the lower Solimões river, Brazilian Amazônia. *Acta Amazonica*, 25 (3/4):201-220
- Martini, A., Rosa, N.; Uhl, C. 1994. An attempt to predict which Amazonian tree species may be threatened by logging activities. *Environmental Conservation*, 21(2):152-162.
- Numazawa, S. 1986. *Aproveitamento de resíduos da exploração florestal em Curua-Una/PA, para produção de carvão vegetal*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 126p.
- Pereira, C.P. 2001. *Avaliação da biomassa acumulada em áreas de vegetação secundária "capoeira" enriquecida com árvores leguminosas, no nordeste do Estado do Pará*. FCAP. SDI. Belém. 36p.
- PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. 2000. Processamento e Comercialização de Madeira e Produtos da Madeira: *Comercialização de Produtos Madeireiros da Amazônia*. Brasília/DF. 70p.
- Reis, M.S. 1989. A Indústria Baseada em Madeiras Duras no Brasil. *Mesa Redonda Internacional: Oportunidade e Limitações para o Desenvolvimento da Indústria Baseada em Madeiras Tropicais na América Latina*. Brasília/DF. p.46
- Rezende, G.C. 1981. Implantação e produtividade de florestas para fins energéticos. In: CETEC. *Gaseificação de madeira e carvão vegetal*. CETEC, Belo Horizonte. p.10-24 (SPT – 004).
- Revista Brasil Madeira. 1980. 42:14-19
- Rodrigues, V. G. S.; Castilla, C.; Costa, R. S. S. & Souza, V. F. 1998. *Produção de biomassa em capoeira melhorada: um passo para os SAF's sustentáveis*. In: II Congresso Brasileiro em Sistemas Agroflorestais. Embrapa-CPATU. Belém. p.93-94

- Salomão, R.P. 1994. *Estimativas de biomassa e avaliação do estoque de carbono da vegetação de florestas primárias e secundárias de diversas idades (capoeiras) na Amazônia Oriental, município de Peixe-boi, Pará*. Dissertação de Mestrado, universidade Federal do Pará/ Museu Paraense Emílio Goeldi. Belém. 53p.
- SUDAM. 1979. *Pesquisas e Informações sobre Espécies Florestais da Amazônia*. DRN/CTM. Belém-Pa. 111p.
- SUDAM; IPT. 1981. *Rendimento de Trintas Espécies de Madeiras Amazônicas*. DRN/CTM. Belém-Pa. 186p.
- Tsuchiya, A.; Hiraoka, M. 1999. Forest biomass and wood consumption in the lower course of the Amazon: a case study of the Urubueua Island. *Acta Amazonica*, 29(1):79-95.
- Uhl, C.; Buschbacher, R.; Serrão, E.A.S. 1988. Abandoned pasture in eastern Amazonia. I patterns of plant succession. *Jornal of Ecology*, 76:663-681
- Verrísimo, A.; Lima, E.; Lentini, M. 2002. *Pólos Madeireiros do Estado do Pará*. IMAZON, Belém. 72p.
- Vidal, E.; Gerwing, J.; Barreto, P.; Amaral, P.; Johns, J. 1997. *Redução de desperdícios na produção de madeira na Amazônia*. IMAZON, Belém. 5:18
- Zoeling, H. 1994. *Madeira & Cia*. 13:12.