



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

DENES DE SOUZA BARROS

**ÍNDICES TÉCNICOS DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS DE
EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM CARVÃO VEGETAL E
CARACTERIZAÇÃO DE SUAS PROPRIEDADES EM DOIS SISTEMAS
DE CARBONIZAÇÃO.**

**Belém-PA
2009**



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

DENES DE SOUZA BARROS

**ÍNDICES TÉCNICOS DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO
FLORESTAL EM CARVÃO VEGETAL E CARACTERIZAÇÃO DE SUAS
PROPRIEDADES EM DOIS SISTEMAS DE CARBONIZAÇÃO**

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

Orientador:
Prof^o. Dr. Suelo Numazawa

**Belém-PA
2009**

Barros, Denes de Souza

Índices técnicos de conversão de resíduos de exploração florestal em carvão vegetal e caracterização de suas propriedades em dois sistemas de carbonização./ Denes de Souza Barros.- Belém, 2010.

49 f.:il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2009.

1. Energia renovável 2. Biomassa vegetal 3. Índices de conversão 4. Impacto reduzido - exploração 5. Propriedade físicas 6. Carvão – química 7. Carvão - mecânica I. Título.

CDD – 662.88



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

**ÍNDICES TÉCNICOS DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO
FLORESTAL EM CARVÃO VEGETAL E CARACTERIZAÇÃO DE SUAS
PROPRIEDADES EM DOIS SISTEMAS DE CARBONIZAÇÃO**

Denes de Souza Barros

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

Aprovada em junho de 2009

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Suelo Numazawa
Orientador
Universidade Federal Rural da Amazônia

Dr. João Olegário Pereira de Carvalho
1º Examinador
Embrapa Amazônia Oriental

Prof. Dr. Paulo Luiz Contente de Barros
2º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia

Prof. Dr. Alcir Tadeu de Oliveira Brandão
3º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia

*À minha **Família**, que em todos os momentos
esteve presente dando-me forças para que este dia chegasse.*

DEDICO .

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela saúde, sabedoria e discernimento para que pudesse realizar esse estudo;

Ao Prof. Dr. Sueo Numazawa, pela orientação, exemplo de capacidade e competência, críticas e sugestões, sobretudo pela confiança em meu trabalho;

Ao Prof. Dr. Paulo Contente pelo apoio, orientação e amizade;

A UFRA – Universidade Federal Rural da Amazônia e ao seu corpo docente, que imensamente contribuíram para este estudo;

Aos amigos do Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais – LTPF/UFRA, pela colaboração e amizade, que foram fundamentais para realização deste estudo, em especial aos amigos Igor Costa, Milena Pantoja, Eliane Souza, Zivanildo Ferreira, Aline Lopes, Eliel Galvão.

À empresa Cikel Brasil Verde Madeiras LTDA, pelo acesso e disponibilidade da área experimental, bem como, pela infra-estrutura e apoio logístico nas pesquisas de campo;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo;

Aos professores da Pós-Graduação pelos preciosos ensinamentos repassados;

A todos os colegas do curso de Mestrado em Ciências Florestais pelo companheirismo e amizade;

A coordenadoria do Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais, em especial, a secretária Mylena, pela ajuda no decorrer do curso de mestrado;

Aos meus amigos: Ana Lúcia, Lélío Mota, Aristeu Jr., Erica Luíza, Erick Baltazar, Luiz Alguto, Stone Cezar, Cecília Ochoua, Luciana Francez, Andrei Leão, Cinthia Soares, Igor Vital, Rivaldo Cardoso, Williams Dias, Fabio Batista, Leidiane Diniz, Carla Costa, Alexandre Ferreira, Bernardo, Alan Péricles, Cássio e Preto, Marcos Baia, Adriana Melo, Leandro Alves, Elizana Sousa, Lorena Barros,...;

A todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente para a execução do deste estudo, sem os quais não teria sido alcançado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1	PRODUÇÃO DE RESÍDUOS FLORESTAIS.....	14
2.2	PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.....	14
2.3	ASPECTOS TÉCNICOS DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA.....	15
2.4	PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL.....	16
2.4.1	Principais características físicas e resistência mecânica do carvão vegetal..	16
2.4.1.1	Densidade do carvão vegetal.....	16
2.4.1.2	Poder calorífico do carvão vegetal.....	17
2.4.1.3	Resistência mecânica do carvão vegetal.....	18
2.4.2	Características química do carvão vegetal.....	19
3	MATERIAL E METODOS.....	20
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
3.2	SELEÇÃO DA MATÉRIA PRIMA PARA O ESTUDO.....	21
3.3	CARBONIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL .	23
3.4	RELAÇÕES DE MEDIDAS DE RESÍDUOS E DE CARVÃO VEGETAL.	24
3.4.1	Determinação do volume dos resíduos de exploração florestal.....	24
3.4.2	Índices de conversão dos resíduos em carvão vegetal.....	25
3.4.2.1	Índice de enchimento do forno.....	25
3.4.2.2	Índice de conversão volumétrica em carvão.....	26
3.4.2.3	Índice de conversão em peso.....	26
3.5	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL.	27
3.5.1	Caracterização das propriedades físicas do carvão vegetal.....	27
3.5.1.1	Densidade a granel do carvão vegetal.....	27
3.5.1.2	Densidade básica aparente do carvão vegetal.....	29
3.5.1.3	Poder calorífico do carvão.....	30
3.5.2	Caracterização das propriedades químicas do carvão.....	31
3.5.2.1	Teor de materiais voláteis.....	31
3.5.2.2	Teor de cinzas.....	32
3.5.2.4	Teor de carbono fixo.....	33
3.5.3	Caracterização das propriedades mecânicas do carvão.....	33
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1	DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM CARVÃO VEGETAL.....	35
4.1.1	Índice de enchimento do forno – IEF.....	35
4.1.2	Índices de conversão volumétrica – ICV.....	36
4.1.3	Índices de conversão em peso – ICP.....	37
4.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DO CARVÃO VEGETAL.....	38
4.2.1	Densidade a granel do carvão.....	38
4.2.2	Densidade básica do carvão.....	39
4.2.3	Poder calorífico do carvão.....	40

4.3	PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CARVÃO VEGETAL.....	40
4.3.1	Teor de materiais voláteis	40
4.3.2	Teor de cinzas	41
4.3.3	Teor de carbono fixo	42
4.4	PROPRIEDADE MECÂNICA DO CARVÃO VEGETAL.....	43
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Influência da temperatura de carbonização no poder calorífico superior do carvão vegetal.	18
Tabela 2	Repartição por fonte geradora de resíduos de exploração florestal em floresta manejada da empresa CIKEL Brasil Madeiras LTDA.	21
Tabela 3	Participação das espécies na mistura dos resíduos de exploração florestal em floresta manejada da empresa CIKEL Brasil Madeiras LTDA..	22
Tabela 4	Comparação de médias da relação índice de enchimento do forno pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/Universidade Federal Rural da Amazônia.	36
Tabela 5	Comparação de médias dos índices de conversão volumétricas pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/Universidade Federal Rural da Amazônia.	37
Tabela 6	Comparação de médias dos índices de conversão em peso pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/Universidade Federal Rural da Amazônia.	38
Tabela 7	Comparação de médias de densidade a granel pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/Universidade Federal Rural da Amazônia.	38
Tabela 8	Comparação de médias de densidade básica (Db) do carvão pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/Universidade Federal Rural da Amazônia.	39
Tabela 9	Comparação de médias do poder calorífico superior (PCS) do carvão pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/Universidade Federal Rural da Amazônia.	40
Tabela 10	Comparação de médias do teor de materiais voláteis (TMV) do carvão pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/Universidade Federal Rural da Amazônia.	41
Tabela 11	Comparação de médias do teor de cinzas (TCi) do carvão pelo teste “t” de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/UFRA.	42
Tabela 12	Comparação de médias do teor de carbono fixo (TCF) do carvão pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/Universidade Federal Rural da Amazônia.	42
Tabela 13	Comparação de médias da resistência mecânica ou friabilidade do carvão pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria. Cikel Brasil Verde/Universidade Federal Rural da Amazônia.	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Resíduos estocados próximos à central de carbonização (forno alvenaria).	23
Figura 2.	Carbonização de resíduos em forno de alvenaria ou rabo quente (A) e forno metálico (B).	23
Figura 3.	Obtenção dos diâmetros (D e d) e comprimento do fuste (L) de resíduos de exploração florestal.	24
Figura 4.	Traçamento (A) e cubagem (B) de resíduos em medidas estereométricas.	25
Figura 5.	Descarregamento do carvão produzido pelos fornos de carbonização metálico (A) e Rabo Quente (C). Pesagem dos balaios utilizados para medição do volume total a granel do carvão produzido no forno metálico (B) e forno de alvenaria (D).	27
Figura 6.	Corpos de prova para determinação da densidade básica do carvão de resíduos de exploração florestal.	29
Figura 7.	Dessecador acoplado a uma bomba a vácuo utilizado para saturação dos corpos de prova utilizado para determinação da densidade básica do carvão.	30
Figura 8.	Bomba calorimétrica utilizada na determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal.	31
Figura 9.	Forno mufla utilizado nas análises de teores de materiais voláteis e teor de cinzas.	32
Figura 10.	Tambor rotatório utilizado para determinação da friabilidade do carvão vegetal.	34

ÍNDICES TÉCNICOS DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM CARVÃO VEGETAL E CARACTERIZAÇÃO DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS EM DOIS SISTEMAS DE CARBONIZAÇÃO

RESUMO

A exploração florestal gera uma grande quantidade de resíduos florestais. Portanto, a produção de carvão vegetal se torna uma forma econômica de aproveitamento dessa biomassa. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo determinar índices de conversão (IC) de resíduos de exploração florestal em carvão vegetal (razão entre o volume de resíduos e o volume nominal do forno em m^3 : VR_{m^3}/VNF_{m^3} - Índice de Enchimento do Forno/IEF; razão entre o volume de resíduos e o volume de carvão, mdc: R_{m^3}/VC_{mdc} , razão entre o volume st. de resíduos e o volume de carvão: VR_{st}/VC_{mdc} , e razão entre o volume do forno e o volume de carvão: VNF_{m^3}/VC_{mdc} , - Índice de Conversão Volumétrica/ICV; razão entre o peso do carvão e o volume dos resíduos enfiados: PC_{ton}/VR_{m^3} , e razão entre o peso do carvão e o volume st. dos resíduos enfiados: PC_{ton}/VR_{st} - Índice de Conversão em Peso - ICP); as características físicas (densidade a granel - Dgr, densidade básica - Db e poder calorífico superior - PCS); químicas (teor de materiais voláteis - TMV, teor de cinzas - TCi e teor de carbono fixo - TCF) e friabilidade (F) do carvão produzidos no forno metálico e forno de alvenaria pertencentes à empresa CIKEL Brasil Verde Madeira LTDA, Paragominas/PA. Para comparação estatística nos dois sistemas de carbonização, foi realizado o teste 't' de Student. Os principais resultados encontrados para o forno de alvenaria e metálico, respectivamente, foram: VR_{m^3}/VNF_{m^3} de 0,69 e 0,62; VR_{m^3}/VC_{mdc} de 0,99 e 1,15; VR_{st}/VC_{mdc} de 1,29 e 1,59; VC_{mdc}/VNF_{m^3} de 1,44 e 1,84; PC_{ton}/VR_{m^3} de 0,243 e 0,166; PC_{ton}/VR_{st} ; a Dgr foi de 238,33 e 189,00 kg/m^3 ; a Db foi de 0,51 e 0,42 g/cm^3 ; o PCS de 6790,60 e 7187,08 $Kcal/Kg$; TMV foi de 23,15 e 20,74 %; TCi de 2,6 e 3,16 %; TCF de 74,24 a 76,10 %; e F do carvão de 25,37 e 29,05 % de perda. O forno de alvenaria apresentou melhores índices do que o forno metálico, resultados que podem ser justificados pela acelerada volatilização ocorrida no forno metálico. Com relação às propriedades físicas, químicas e mecânica não foi possível distinguir qual o processo de carbonização produz melhor carvão, devido os testes não apresentarem diferenças significativas, exceto para a densidade a granel do carvão, esta diferença pode estar ligada a granulometria do carvão e/ou a densidade básica do resíduo que o originou.

Palavras-chave: energia renovável, biomassa vegetal, índices de conversão, exploração de impacto reduzido, propriedade físicas, químicas e mecânicas do carvão.

TECHNICAL INDICES OF CONVERSION OF WASTE INTO CHARCOAL FOREST EXPLOITATION AND CHARACTERIZATION OF THEIR PHYSICAL PROPERTIES IN TWO SYSTEMS CARBONIZATION

ABSTRACT

The forestry exploration generates a large amount of forest residues. So, the production of charcoal becomes this residue a form of economic exploitation of biomass. Thus, this study aimed to determine rates of conversion (IC) of residues from logging into charcoal (ratio between the volume of waste and the nominal volume of the furnace in m^3 : $VR\ m^3 / VNFm^3$ - Index Filling Oven / IEF; ratio of the volume of waste and the volume of coal, mdc : $Rm^3 / VCmdc$, the volume ratio of st. waste and the volume of coal: $VRst / VCmdc$, and ratio of the volume of the oven and the volume of coal: $VNFm^3 / VCmdc$ - Content Conversion Volumetric / ICV; ratio between the weight of coal and the volume of waste put into the furnace: $PCton / VRM^3$, and ratio between the weight and volume of coal st. waste kiln: $PCton / VRst$ Index - Conversion in Weight - ICP); the physical characteristics (bulk density - Gr_d , basic density - Bd and gross calorific value - GCV), chemical (volatile materials content - VMC , ash - TCi and carbon fixed - TCF) and friability (F) coal produced in the kiln furnace metal and masonry company belonging to the CIKEL Brasil Verde LTDA, Paragominas / PA. For statistical comparison in the two systems of carbonization was performed for 't' test of Student. The main results for the furnace masonry and metal, respectively, were: $VR\ m^3 / VNFm^3$ 0.69 and 0.62; $VRM^3 / VCmdc$ 0.99 and 1.15; $VRst / VCmdc$ 1.29 and 1, 59; $VCmdc / VNFm^3$ 1.44 and 1.84; $PCton / VRM^3$ 0.243 and 0.166, $PCton / VRst$; the Dgr was 238.33 and 189.00 kg / m^3 , the Db was 0.51 and 0.42 g / cm^3 , the PCS of 6790.60 and 7187.08 $Kcal / Kg$; TMV was 23.15 and 20.74%; TCi 2.6 and 3.16%, to 74.24 TCF 76.10% and F of charcoal of 25.37 and 29.05% loss. The brick oven had better rates than the metal furnace, results can be explained by accelerated volatilization occurred in the furnace metal. With respect to physical, chemical and mechanical unable to distinguish the carbonization process produces more coal, because the tests did not differ significantly, except for a bulk density of coal, this difference may be linked to the coal particle size and / or the basic density of the waste that resulted.

Words key: Renewable Energy; Biomass Plant; conversion rates; reduced impact logging; physical, chemical and mechanical charcoal properties.

1 INTRODUÇÃO

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 (AQUINO, 2003). Desde o início do século XX utiliza-se carvão vegetal como termo redutor da indústria siderúrgica, sendo este seu maior consumidor (VALE *et al.*, 1997). No entanto, o desenvolvimento tecnológico do seu processo produtivo praticamente não existiu, sendo ele ainda hoje produzido a partir de métodos rudimentares, em fornos de alvenarias (ARRUDA, 2005; VALE *et al.*, 2001).

Sendo a madeira o principal energético que compõe a biomassa no Brasil, com a exploração de florestas nativas, em particular, para a extração de lenha e produção de carvão, tem levado ao desmatamento de grandes áreas no território brasileiro. A escassez de florestas obriga os consumidores a buscar madeiras em lugares distantes, situação que resulta em maiores custos financeiros (VALE e NOGUEIRA, 2001). Numazawa (1986), Brito e Barrichello (1981), afirmam que não é admissível a conversão integral de uma floresta em carvão vegetal, mas sim o aproveitamento de fontes disponíveis como madeiras remanescentes de exploração florestal, de resíduos de indústrias madeireiras, de capoeiras, etc.

Além do benefício econômico do aproveitamento do resíduo de exploração evidenciado por Graça e Campos (1986), a emissão de gases, e particularmente o CO₂, é provavelmente menor do que aquela que ocorre quando simplesmente lança-se mão da combustão total da madeira, como freqüentemente verifica-se nas queimadas das florestas. É que na carbonização, 30 a 40% do massa da madeira submetida ao processo são recuperados na forma de carvão vegetal e, portanto, não são convertidos em gases; além de menor, a emissão de gases é diluída ao longo de praticamente todos os meses do ano, e não brutalmente concentrada na época de estiagem, como ocorre nas queimadas (BRITO, 1990).

Os resíduos gerados pela atividade de exploração florestal na Amazônia, especialmente os gerados pela exploração de impacto reduzido, são fontes de matéria-prima que poderiam ser utilizados para diversos fins. Esses resíduos consistem de galhadas de copas, árvores quebradas acidentalmente ou não e outros tipos de materiais que ficam na floresta sem uso definido, que podem ser aproveitados para fins energéticos.

O termo resíduo de madeira por muitas vezes é associado à palavra problema, pois sua disposição ou utilização gera custos altos que muitas vezes se quer evitar. Porém, o conhecimento da quantidade, das qualidades e das possibilidades de uso deste material pode gerar alternativas de uso que viabilizem o seu manuseio.

Hoje, sabe-se que os resíduos de exploração florestal são uma fonte importante de biomassa que poderia ser aproveitada, principalmente para a fabricação de carvão vegetal, insumo indispensável às siderúrgicas que demandam uma enorme quantidade desse material. Porém, a região ainda se ressentida de informações técnicas sobre medidas de conversão e de rendimento do processo de carbonização, que possam ser definidas como padrões ou de indicativos às condições específicas de florestas tropicais.

Com relação ao aspecto do processo de conversão da madeira em carvão, o setor envolvido nessa linha de produção ainda se depara com incertezas quanto à questão de melhor tecnologia, maior produtividade e, enfim, de maior domínio do processo para promover a melhor qualidade dos serviços e dos produtos aos usuários dessa matéria-prima essencial como fonte de energia.

O carvão vegetal é um insumo amplamente utilizado pelas siderurgias brasileiras como agente redutor, principalmente, por se tratar de uma matéria-prima renovável e pouco poluente, quando comparada aos combustíveis fósseis, sendo empregado na produção de ferro-gusa, aço e ferro-liga (ARRUDA, 2005).

Há, portanto, a necessidade de se buscar conhecimentos sobre o comportamento na carbonização de resíduos de espécies nativas da região amazônica, assim como sobre os métodos de controle de qualidade, em campo, permitindo assim caracterizar as propriedades do carvão vegetal, oriundo de resíduos de exploração florestal e resíduos de indústrias madeireiras, considerando o grande desperdício dos mesmos (SILVA *et al.*, 2007).

Considerando a importância da atividade madeireira no Pará e, por conseguinte a produção de resíduos de exploração florestal madeireira e sua utilização para produção de carvão vegetal e a falta de parâmetros técnicos que norteiem tal produção o presente trabalho teve como objetivo geral determinar índices técnicos de conversão de resíduos de exploração florestal em carvão; determinar as características físicas, químicas e mecânicas do carvão de resíduos de exploração florestal em dois sistemas de carbonização em forno metálico e em forno de alvenaria.

Como objetivos específicos foram: determinar o índice de enchimento do forno (m^3/VNF); determinar dos índices de conversão volumétrica dos resíduos florestais (m^3/mdc ;

st/mdc; mdc/VNFm³); determinar do índice de conversão em peso do carvão (ton./m³; ton./st); avaliar as características físicas concernentes à densidade básica e poder calorífico do carvão; avaliar as características químicas concernentes a teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo e avaliar a característica mecânica concernente a friabilidade do carvão de resíduos de exploração vegetal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PRODUÇÃO DE RESÍDUOS FLORESTAIS

Balloni, Migliorini e Brito (1980) definem resíduos florestais como sendo todo material originado das árvores e que, tradicionalmente, permanecem no campo após a exploração das mesmas. São folhas, galhos, casca e árvores com diâmetros inferiores ao limite exigido pela indústria, materiais estes que atualmente se encontram disponíveis para uso energético.

Segundo Lentini *et al.* (2005), o consumo de madeira, no ano de 2004, no estado do Pará foi de 11,15 milhões de m³, estando em primeiro lugar em produção de madeira na Amazônia Legal. Perante a Instrução Normativa 05/2005 do MMA/IBAMA, o índice de conversão aceito, para PMFS que não possui estudo de inventário de resíduos, é de um m³ de resíduo para cada um m³ madeira. Portanto, teríamos no mercado uma produção de aproximadamente 11,15 milhões de m³ só de resíduos de exploração florestal.

Um estudo realizado por Barros, Numazawa e Barros (2007) verificaram que uma empresa que utiliza como técnica de colheita de extração de madeira a chamada “*exploração de impacto reduzido*” produz, após sua exploração florestal finalizada, em torno de 69,7m³/ha. Com esses dados têm-se a idéia de quanta biomassa poderia estar-se produzindo anualmente no estado do Pará, e que poderia estar sendo utilizada na diversificação da produção madeireira no estado.

2.2 PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

No Brasil a produção de carvão vegetal, em sua maioria, é feita em fornos de alvenaria pouco desenvolvidos, onde o controle da carbonização depende do conhecimento do operador. Estes se baseiam em fatores subjetivos, como coloração da fumaça nas paredes e porta do forno e a temperatura das paredes sentida pelo tato da mão (ARRUDA, 2005).

De uma maneira geral, sabe-se que a qualidade do carvão vegetal a ser produzido depende basicamente da espécie madeireira e do método ou processo de carbonização utilizado (VALE *et al.*, 2001; FONTES, 1989). O manejo desses fornos e a qualidade da madeira enforada determinam o rendimento e a qualidade do carvão vegetal produzido (VALE *et al.*, 2001).

Os diversos processos de industrialização exigem madeiras com diferentes características e por isso, a qualidade da madeira depende da finalidade à qual ela se destina. Assim, quando se pretende produzir madeira para fabricação de carvão vegetal, os produtores tem procurado utilizar madeira com menor teor de umidade e de maior densidade, o que resulta em carvão mais denso, além de produzir uma maior produção gravimétrica por unidade de forno (VITAL, JESUS e VALENTE, 1986).

A qualidade e a produção de carvão vegetal dependem, pelo menos em parte, da qualidade da madeira utilizada. Por sua vez, a qualidade da madeira é um conjunto de características físicas, químicas e mecânicas que geralmente são interdependentes e, por isso, dificilmente se consegue alterar uma propriedade sem que as demais também sejam afetadas (VITAL, JESUS e VALENTE, 1986).

Segundo a AMS (2008), a produção de carvão vegetal no estado do Pará em 2007 chegou ao patamar de 10,44 milhões de mdc. Essa produção representa 28% do consumo nacional, estando apenas atrás do estado de Minas Gerais.

2.3 ASPECTOS TÉCNICOS DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

A pirólise ou destilação seca da madeira, também conhecida como carbonização, é o processo pelo qual a madeira é aquecida em ambiente fechado e na presença controlada de oxigênio (ar). Este processo é caracterizado por reações que resultam em modificações estruturais das fibras de madeira, ocorrendo uma degradação gradativa de seus componentes e formação de diversos produtos. Gases (CO₂, CO, H₂, CH₄, etc.), líquidos orgânicos (alcatrões,

ácido acético, álcool metílico, etc.) e vapores d'água são liberados, ficando o carvão vegetal como resíduo sólido do processo (FONTES, 1989).

O comportamento técnico da madeira, no processo de carbonização, reflete a soma das respostas técnicas de seus três principais componentes: celulose, hemicelulose e lignina, presentes na madeira em proporção, aproximada, de 50:20:30, respectivamente. A hemicelulose começa a perder peso na temperatura próxima de 225°C, e na temperatura de 325°C já está completamente degradada, sendo o componente menos estável. A celulose sofre um processo de degradação em curto intervalo de temperatura, 325°C - 375°C, provocando drásticas mudanças em seu comportamento. A lignina começa a se degradar em temperaturas mais baixas, a partir de 150°C, tendo uma degradação mais lenta em relação à celulose e à hemicelulose, continuando a perder peso em temperaturas acima de 500°C, tendo como resultado o resíduo carbonífero – carvão vegetal (ANDRADE e CARVALHO, 1998; FONTES, 1989; BRITO e BARRICHELO, 1981).

A lignina é, portanto, o composto mais importante quando se objetiva a produção de carvão vegetal (ANDRADE e CARVALHO, 1998; FONTES, 1989). Vários estudos relatam que existe uma relação direta entre o rendimento em carvão e o teor de lignina, ou seja, quanto maior for o teor de lignina maior será o rendimento em carvão (FONTES, 1989; PASTORE *et al.*, 1989; VITAL, JESUS e VALENTE., 1986; BRITO e BARRICHELO, 1981). A lignina é responsável por 55 a 60% do carvão produzido a uma temperatura máxima de carbonização de 500°C (VITAL, JESUS e VALENTE, 1986).

2.4 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL

Dentre as propriedades e características do carvão vegetal, as mais representativas, considerando o seu uso energético, são: a física, característica química e a mecânica.

2.4.1 Principais características físicas e resistência mecânica do carvão vegetal

2.4.1.1 Densidade do carvão vegetal

No carvão vegetal, a densidade é uma propriedade importante. Sendo o carvão um material bastante poroso (70-80% de porosidade), deve-se distinguir o que se quer dizer com densidade do carvão, que varia segundo a técnica utilizada na sua medida (FONTES, 1989).

Se tomarmos uma caixa de 1m^3 e a enchermos de carvão, teremos a relação peso obtido/volume (m^3), a chamada densidade de granel (*bulk density*) e expressa em kg/m^3 . Geralmente este valor está em torno de $250\text{ kg}/\text{m}^3$ para este produto vegetal. Se desta medida diminui-se o volume dos vazios entre os vários pedaços de carvão, considerando os poros internos como ocupados pelo material do carvão, teremos então a densidade relativa aparente (*specific gravity*). A densidade relativa, embora seja fundamentalmente diferente da densidade de granel, é uma boa medida de carvão presente na amostra (FONTES, 1989).

Vale *et al.* (2001) e Fontes (1989) denotam que de maneira geral a qualidade do carvão vegetal a ser produzido depende basicamente da espécie madeireira e do método ou processo de carbonização utilizado.

Os parâmetros que atuam na densidade do carvão são a densidade da madeira que lhe deu origem (PASTORE, OKINO e PASTORE Jr., 1989; FONTES, 1989), a temperatura de carbonização e a granulometria do carvão. Estudos realizados por Vale *et al.* (2001), Pastore *et al.* (1989) mostraram que a densidade relativa do carvão será maior quando for maior a densidade da madeira. Na densidade de granel o fator de maior influência é a granulometria, ou seja, o peso de um determinado volume de carvão que varia com sua granulometria (FONTES, 1989).

2.4.1.2 Poder calorífico do carvão vegetal

Define-se poder calorífico de um combustível como o número de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível, expresso em kcal/kg para combustíveis sólidos e líquidos. Esta propriedade é de grande importância, principalmente quando se pensa na utilização do carvão como fonte de energia. A determinação do poder calorífico pode ser feita teoricamente através da composição química elementar do carvão, ou experimentalmente em bomba calorimétrica (FONTES, 1989).

Segundo Vale *et al.* (2002), o poder calorífico apresenta correlação positiva com a temperatura de carbonização, ou seja, quando se aumenta a temperatura de carbonização do

forno, tem-se um maior poder calorífico do carvão vegetal. Este comportamento pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1. Influência da temperatura de carbonização no poder calorífico superior do carvão vegetal.

Temperatura C°	PCS (Cal/g)
300	6648
400	7261
500	7604
600	7983
700	8146
800	8084

Fonte: VALE *et al.* (2002) com adaptações.

2.4.1.3 Resistência mecânica do carvão vegetal

Resistência mecânica do carvão ou friabilidade do carvão é outra característica de suma importância no seu emprego em siderurgia (BRITO, 1993). A friabilidade de um material é a possibilidade que ele possui de ser transformado em pó. No caso do carvão vegetal, entende-se como friabilidade a propriedade que este possui de gerar finos, quando sujeito a abrasão e a queda. É fato bem conhecido que o carvão vegetal é altamente friável, sendo esta propriedade de alta preocupação para as pessoas envolvidas no seu processo de fabricação, transporte, estocagem, peneiramento e principalmente os seus consumidores finais (BRITO, 1993; FONTES, 1989).

Os processos de carbonização em diferentes temperaturas implicam na obtenção de carvão com mudanças nas suas propriedades físicas e químicas. A friabilidade é uma das propriedades do carvão que varia em função da temperatura final de carbonização. Estudo realizado por Coutinho e Ferraz (1988) detectou que a geração de finos aumenta com o acréscimo na temperatura de carbonização.

Outro aspecto importante é com relação à velocidade de aquecimento com que se faz a carbonização da madeira. Além de influenciar nos rendimentos de carvão e seus produtos, influencia também na friabilidade do carvão, isto é, um carvão produzido em carbonização

rápida (3,4°C/min) é muito mais friável que o carvão produzido em carbonização lenta (0,1°C/min) (FONTES, 1989).

É bastante conhecida a influencia do diâmetro da madeira na susceptibilidade de formação de trincas durante a carbonização. As trincas e fissuras internas do carvão constituem-se em zonas de concentração de tensão que podem ser atribuídas à grande impermeabilidade do cerne das peças de madeira. Quando uma peça de madeira é carbonizada, o alburno seca rapidamente e a umidade do cerne é retirada com dificuldade, devido à sua menor permeabilidade. Nessas condições, a pressão do vapor dos gases aumenta no interior, podendo ocorrer ruptura das células fibrosas com desenvolvimento de trincas, sendo comum encontrar em áreas carbonizadas áreas representativas de cerne fissuradas, enquanto as de alburno não são fissuradas (FONTES, 1989).

Coutinho e Ferraz (1988) concluíram que a geração de finos pelo carvão aumenta diretamente com a temperatura de carbonização e que para se ter uma menor geração de finos, deve-se, de preferência existir um maior controle da carbonização.

2.4.2 Características químicas do carvão vegetal

Dentre as características químicas mais importantes inerentes à qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico, destacam-se o teor de cinzas, teor de materiais voláteis e teor de carbono fixo, denominadas de análise química imediata. Esta valorização talvez tenha ocorrido, em primeiro lugar, devido à simplicidade com que se pode proceder à análise, fazendo com que a mesma se torne rotineira. Em segundo lugar surge o fato da existência de uma boa correlação do teor de carbono fixo e o teor de carbono elementar existente no carvão, principalmente, quando o mesmo é obtido a temperaturas superiores a 400°C (BRITO, 1993).

Os constituintes inorgânicos da madeira permanecem, quase que integralmente, na constituição química do carvão vegetal. Esses elementos minerais, detectados na forma de cinza, quando em altos teores, reduzem significativamente as qualidades físicas e químicas do carvão vegetal. Por exemplo, quando possui teores elevados de fósforo e de enxofre, o carvão vegetal torna-se inadequado para a produção de ferro-gusa e de alguns tipos de ferros-liga (ANDRADE e CARVALHO, 1998).

O teor de materiais voláteis representa compostos remanescentes do alcatrão que não se desprenderam durante o processo de carbonização, permanecendo assim como componente

químico do carvão (CORREA, 1988). Dentro de certos limites, a vantagem do uso de carvões com teores mais elevados em materiais voláteis estaria relacionada, possivelmente, a um melhor balanço na geração e utilização de gases no contexto global da usina, além de aspectos econômicos, associados à possibilidade da obtenção de melhores rendimentos de conversão madeira/carvão (BRITO, 1993).

Outra vantagem indicada para o uso de carvão vegetal com elevados teores de carbono fixo é a conseqüente presença, em menor quantidade, de materiais voláteis no produto. Com isso, as fissuras decorrentes da eliminação destes materiais durante o aquecimento seriam menores, diminuindo-se assim o índice de redução granulométrica e de geração de finos no alto forno. Há, contudo, indicações de outra corrente de interpretação para a questão dos teores de carbono fixo e de materiais voláteis do carvão vegetal usado no alto-forno siderúrgico. Tal corrente indica a possibilidade do uso de carvão com menores teores de carbono fixo e, conseqüentemente, teores mais elevados de materiais voláteis. Neste caso, deve-se considerar que os materiais voláteis também participariam das reações do auto-forno, dada à presença de substâncias redutoras em sua constituição (BRITO, 1993).

No carvão a ser utilizado, em siderurgia, o teor de carbono fixo é muito importante, porque é através desta característica que se processa a redução do ferro (CORREA, 1988).

Segundo a FAO (1983), o carvão vegetal que tem como objetivo o abastecimento de empresas siderúrgicas deve, necessariamente, apresentar maior rendimento em produto sólido (carvão), alta densidade, elevado poder calorífico, pouca friabilidade, alto teor de carbono fixo e baixo teor de materiais voláteis e cinzas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O material analisado é proveniente da Fazenda Rio Capim, de propriedade da Empresa CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda., localizada no município de Paragominas, distante cerca de 320 km de Belém, PA. As coordenadas geográficas levantadas na floresta da empresa foi de Latitude 03° 42' 15" a 03° 45' 25" S e Longitude de 48° 32' 06" a 48° 42' 01" W a oeste de Greenwich.

O município de Paragominas está localizado no Nordeste do Estado do Pará, na microrregião homogênea Guajarina (WATRIN; ROCHA, 1991). A área é caracterizada por possuir períodos de elevados índices de chuva, 250 mm mensais, e períodos de baixos índices (SUDAM/EMBRAPA, 1993). O período chuvoso tem início em novembro/dezembro, prolongando-se a março/abril com precipitação pluviométrica anual de 1.800 a 2.100 mm. A temperatura média anual é de 27°C. A umidade relativa do ar é alta, com valores entre 80 e 85%. Segundo a classificação de Köppen, o clima dominante na região é do tipo “Awi”. A tipologia na área de estudo segundo Veloso *et al.* (1991) é floresta ombrófila densa submontana (floresta equatorial úmida de Terra-firme).

3.2 SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA PARA O ESTUDO

A matéria-prima de que trata este trabalho consistiu de resíduos de exploração extraídos da Área de Manejo Florestal (AMF) pertencente à CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda., pelo sistema de exploração de resíduos da própria empresa. Os resíduos foram classificados levando em consideração a fonte geradora de resíduo, estas fontes foram descritas por Barros, Numazawa e Barros (2007) e pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 02. Repartição por fonte geradora de resíduos de exploração florestal em floresta manejada da empresa CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda., Paragominas, PA.

Fonte Geradora de Resíduos	%
1. Resíduos de copa e de árvores caídas durante a exploração florestal	75,83
2. Resíduos gerados pela abertura de estradas, trilhas e pátios (10 cm ≤ DAP ≤ 30 cm)	15,23
3. Resíduos de estradas Principal, Secundária e pátios gerados pelo corte das árvores com DAP > 30 cm	2,65
4. Resíduos gerados por queda natural de árvores, sob a influência das trilhas de arraste	1,14
5. Resíduos gerados por toras ocas e aparas de toras deixados nos pátios	0,50
6. Resíduos gerados por sapopemas	4,67
Total	100,00

Fonte: Barros, Numazawa e Barros (2007).

Conforme apresentado na Tabela 2, o maior percentual de resíduos de exploração florestal (75,83%), consistiu de resíduos de copa de árvores derrubadas durante a exploração florestal de mais de 18 espécies, conforme demonstradas na Tabela 3. O ciclo de carbonização do forno metálico é de 16 horas, enquanto que para o forno de alvenaria é de 7 dias.

Os resíduos, após retirados da floresta, eram estocados próximo às centrais de carbonização para facilitar o transporte e enchimento nos fornos (Figura 1). Os diâmetros dos resíduos que foram carbonizados, variavam de 05 a 30 cm, com aproximadamente 1 m de comprimento. Estas dimensões foram utilizados por apresentarem maior facilidade e ergonomia no processo de enchimento dos fornos, uma vez que, diâmetros muito grandes cansavam em demasia os trabalhadores da carvoaria.

Tabela 03. Participação das espécies na mistura dos resíduos de exploração florestal em floresta manejada da empresa CIKEL Verde Brasil Madeiras Ltda..

Nº	Nome Científico	Participação (%)
1	<i>Euxylophora paraensis</i> Huber	2,4
2	<i>Trichilia</i> sp.	3,2
3	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	4,5
4	<i>Protium spruceanum</i> Engl.	3,6
5	<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	2,1
6	<i>Parkia</i> sp.	4,8
7	<i>Chrysophyllum</i> sp.	2,8
8	<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	4,4
9	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	4,6
10	<i>Ocotea</i> sp.	4,1
11	<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Chevalier	30,7
12	<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	3,9
13	<i>Astronium lecointei</i> Ducke	4
14	<i>Aspidosperma spruceanum</i> Benth. ex Müll.Arg.	2
15	<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	3,5
16	<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	3,2
17	<i>Piptadenia suaveolens</i> Miq.	3,8
18	Diversas	12,4
Soma		100

Fonte: Barros, Numazawa e Barros, 2007 com adaptações.



Figura 1. Resíduos estocados próximos à central de carbonização (forno de alvenaria). Fazenda Rio Capim, Paragominas, PA.

3.3 CARBONIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL

A carbonização foi realizada em forno de alvenaria também conhecido como Rabo Quente e forno metálico cilíndrico vertical (Figura 2) utilizados pela empresa, com capacidade volumétrica nominal de 16 m³ e 4,6 m³, respectivamente.



Figura 2. Carbonização de resíduos em forno de alvenaria ou rabo quente (A) e forno metálico (B). Fazenda Rio Capim, Paragominas, PA.

A coleta dos dados referentes à carbonização dos resíduos de exploração florestal deu-se de forma que não interferisse na rotina normal de trabalho da empresa. Este cuidado fez-se necessário para não influenciar na produção de carvão da empresa.

3.4 RELAÇÕES DE MEDIDAS DE RESÍDUOS E DE CARVÃO VEGETAL

3.4.1 Determinação do volume dos resíduos de exploração florestal

Inicialmente, os resíduos foram cortados para a obtenção das medidas de circunferência e comprimento (Figura 3) visando determinar o volume geométrico das peças por meio das equações 1, 2 e 3. Em seguida, preparou-se uma grade com dimensões internas de 1m³, onde foram empilhados os resíduos para obtenção do volume estéreo (Figura 4).

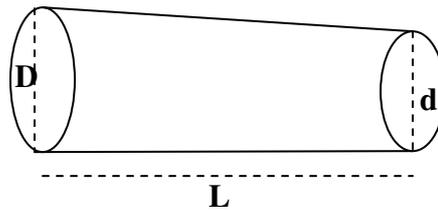


Figura 3. Obtenção dos diâmetros (D e d) e comprimento do fuste (L) de resíduos de exploração florestal.

$$V = \frac{(g_1 + g_2) \cdot L}{2} \quad (\text{Equação 1})$$

$$g_1 = \frac{\pi \cdot (D/100)^2}{4} \quad (\text{Equação 2}) \quad \text{e,}$$

$$g_2 = \frac{\pi \cdot (d/100)^2}{4} \quad (\text{Equação 3})$$

Considerando que,

V - volume geométrico do resíduo, m³;

D - diâmetro da extremidade maior, cm;

d - diâmetro da extremidade menor, cm;

L - comprimento do resíduo, m;

g_1 - área transversal da extremidade maior, m²;

g_2 - área transversal da extremidade menor, m².



Figura 4. Traçamento (A) e cubagem (B) de resíduos em medidas estereométricas. Fazenda Rio Capim, Paragominas, PA.

3.4.2 Índices de conversão dos resíduos em carvão vegetal

3.4.2.1 Índice de enchimento do forno

O fator de enchimento do forno consistiu na relação entre o volume dos resíduos enforados (m³) e o volume nominal do forno (m³), conforme a equação (Equação 4).

$$IEF = \frac{VR}{VNF} \quad (\text{Equação 4})$$

Considerando que,

IFE – Fator de enchimento do forno;

VR - Volume de resíduos, em m³ ou st;

VNF - Volume nominal do forno, em m³.

3.4.2.2 Índice de conversão volumétrica em carvão

O índice de conversão volumétrica do processo de conversão dos resíduos em carvão vegetal consistiu na relação entre o volume dos resíduos enforados (m³ ou st) e o volume do carvão obtido (mdc) baseados nas duas formas de medidas: geométrica e estereométrica (Equação 5).

$$ICV = \frac{VR \text{ ou } VNF}{VC} \quad (\text{Equação 5})$$

Considerando que,

ICV – Índice de conversão volumétrica;

VR - Volume de resíduos, em m³ ou st;

VNF - Volume nominal do forno, em m³;

VC - Volume do carvão, em mdc.

3.4.2.3 Índice de conversão em peso.

O índice de conversão em peso consistiu na relação entre o peso de carvão obtido (ton) e o volume de resíduos enforados (*VR* em st ou m³), calculado através da Equação 6.

$$ICP = \frac{PC}{VR} \quad (\text{Equação 6})$$

Considerando que,

ICP - índice de conversão em peso;

PC - peso do carvão obtido, ton.;

VR - volume dos resíduos enforados, m³ ou st.

3.5. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL

3.5.1 Caracterização das propriedades físicas do carvão vegetal

3.5.1.1 Densidade a granel do carvão vegetal

O volume do carvão produzido é expresso em mdc (metro de carvão) que consiste na medida do carvão contido em um recipiente de 1m³. Após a carbonização dos resíduos, o carvão foi retirado do interior do forno (Figura 05). Utilizaram-se balaio com capacidade de 0,2 m³ (200 litros) e 1 m³ (1000 litros), conforme demonstrado na Figura 5, preenchidos completamente com carvão e depois pesados.

O volume de carvão a granel por forno consistiu na somatória de número de balaio multiplicados pelo volume do balaio, conforme a Equação 7.



Figura 5. Descarregamento do carvão produzido pelos fornos de carbonização metálico (A) e Rabo Quente (C). Pesagem dos balaio utilizados para medição do volume total a granel do carvão produzido no forno metálico (B) e forno de alvenaria (D). Fazenda Rio Capim, Paragominas, PA.

$$VCF = NT \times VT \quad (\text{Equação 7})$$

Considerando que,

VCF - volume do carvão a granel por fornada, m³;

NT - número de balaios;

VT - volume do balaio, m³.

O peso do carvão consistiu na somatória do número de balaios multiplicado pelo peso do carvão em cada balaio conforme equação 8.

$$PCF = \sum PCT \quad (\text{Equação 8})$$

Considerando que,

PCF - peso do carvão por fornada, m³;

PCT – peso do carvão por balaio.

A densidade do carvão a granel expressa o peso dos pedaços de carvão contidos em um recipiente de volume conhecido. Esses balaios foram pesados em uma balança com capacidade de 100 kg. A densidade a granel foi calculada através da Equação 9.

$$D_{gr} = \frac{P_{carvão}}{V_{recip.}} \quad (\text{Equação 9})$$

Considerando que,

D_{gr} - Densidade do carvão a granel, g/cm³;

$P_{carvão}$ - Peso do carvão, kg;

$V_{recip.}$ - Volume do recipiente, m³.

O volume do balaio foi determinado com base no volume de um cilindro por meio da equação 10.

$$VT = 0,7854xD^2xC \quad (\text{Equação 10})$$

Considerando que,

VT - volume do tambor, m³;

D - diâmetro do tambor, m;

C - comprimento do tambor, m.

3.5.1.2 Densidade básica aparente do carvão vegetal

Para esta análise foi utilizado o carvão produzido em cinco fornadas e coletados em sacos de 60 kg para cada fornada. Essas amostras foram analisadas no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais – LTPF da Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA. Das amostras de carvão coletadas foram preparados 10 corpos por forno (Figura 6), com dimensões aproximadas de 2 cm x 2 cm x 3 cm, adaptando-se à Norma MB 1269/79 da ABNT que trata da densidade da madeira. A densidade básica do carvão vegetal foi determinada conforme a Equação 11.



Figura 6. Corpos de prova para determinação da densidade básica do carvão de resíduos de exploração florestal, oriundos da Fazenda Rio Capim, Paragominas, PA.

$$Db = \frac{P_{(c.s.)}}{V_{(sat.)}} \quad (\text{Equação 11})$$

Considerando que,

Db - Densidade básica aparente do carvão, g/cm^3 ;

P_{cs} - Peso do carvão seco, g;

V_{sat} - Volume do carvão saturado, g/cm^3 .

A saturação dos corpos de prova foi realizada submergindo-se o carvão em água destilada dentro de um dessecador acoplado a uma bomba a vácuo (Figura 7). A completa saturação foi alcançada no momento em que o peso do corpo de prova não sofreu mais variação em três pesagens consecutivas. Normalmente, para o carvão vegetal, esta condição é rapidamente alcançada, devido a sua alta permeabilidade. O volume do corpo de prova foi determinado através do método de pesagem que se baseia no princípio de Arquimedes. Após a determinação do volume saturado do corpo de prova, este foi submetido à secagem em uma estufa com $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingir estabilização do peso, após três pesagens consecutivas, correspondente ao peso do corpo de prova absolutamente seco (0% de umidade).



Figura 7. Dessecador acoplado a uma bomba a vácuo utilizado para saturação dos corpos de prova utilizado para determinação da densidade básica do carvão, Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da UFRA, Belém, PA.

3.5.1.3 Poder calorífico do carvão

O poder calorífico superior (PCS) representa a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa combustível (carvão vegetal). O poder

calorífico superior foi determinado com base na norma D 250/50 da ASTM (American Society for Testing and Material), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática (Oxygen Bomb Calorimeter), baseada no método de Berttelot, que consistiu na combustão do material em um ambiente fechado na presença de oxigênio e sob pressão (Figura 8). Foram utilizadas três amostras por forno. O material utilizado foi o carvão passado em peneira com 25 mesh e retido em peneira de 45 mesh, desprovido de umidade. Essas partículas foram obtidas por meio de processo mecânico.



Figura 8. Bomba calorimétrica utilizada na determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal, Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da UFRA, Belém, PA.

3.5.2 Caracterização das propriedades químicas do carvão.

A análise química imediata se refere à determinação das porcentagens do Teor de Materiais Voláteis (TMV), Teor de Cinzas (TCi) e Teor de Carbono Fixo (TCF), contidos no carvão, tendo como base a Norma D1762/64 da ASTM.

O carvão utilizado é o carvão preparado com os mesmos procedimentos do item anterior (3.5.1.3.).

3.5.2.1 Teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis consiste na relação entre o peso dos voláteis existentes no carvão e o peso do carvão absolutamente seco. Utilizaram-se cinco cadinhos de porcelana com tampas por forno, nos quais foram colocados cerca de três gramas de carvão moído em

balança analítica (precisão de 0,0001g). Em seguida, o carvão foi submetido à calcinação em um forno mufla a 950°C, durante 6 minutos (Figura 9). O teor de materiais voláteis foi determinado através da Equação 12.



Figura 9. Forno mufla utilizado nas análises de teores de materiais voláteis e teor de cinzas, Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da UFRA, Belém, PA.

$$TMV = \left(\frac{P_{(c.s.)} - P_{(c.cal.)}}{P_{(c.s.)}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 12})$$

Considerando que,

TMV - Teor de materiais voláteis (%);

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

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

3.5.2.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas consiste na relação entre o peso das cinzas e o peso do carvão absolutamente seco. Utilizaram-se cinco cadinhos sem as tampas por forno com cerca de 3 gramas das amostras de carvão moído, com a mesma granulometria do carvão utilizado para

materiais voláteis. Em seguida, os cadinhos foram submetidos à combustão completa sob temperatura de 750 °C durante 6 horas. O teor de cinzas foi calculado através da Equação 13.

$$TCi = \frac{P_{ci}}{P_{(c.s.)}} \times 100 \quad (\text{Equação 13})$$

Considerando que,

TCi - Teor de cinzas (%);

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

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

3.5.2.4 Teor de carbono fixo

A partir da obtenção de materiais voláteis e de cinza, o teor de carbono fixo foi determinado indiretamente através da Equação 14.

$$TCF = 100 - (TMV + TCi) \quad (\text{Equação 14})$$

Considerando que:

TCF – Teor de carbono fixo (%);

TMV – Teor de materiais voláteis (%);

TCi – Teor de cinzas (%).

3.5.3 Caracterização das propriedades mecânicas do carvão

A característica mecânica é de suma importância para o carvão vegetal, pois, é a capacidade de resistência à formação de pó ou partículas devido a atritos e choques provocados durante o seu manuseio no carregamento, transporte e descarregamento, característica denominada de friabilidade do carvão. Essa propriedade é determinada pelo teste de tamboramento, de acordo com a Norma MB 1375/80 da ABNT, que consiste em

submeter o carvão (± 500 g) à ação de atritos e choques em um tambor rotativo a 30 rpm (Figura 10) durante quinze minutos. A friabilidade é determinada através da Equação 15.

$$F = \frac{P_i - P_{(r)}}{P_{(i)}} \times 100 \quad (\text{Equação 15})$$

Considerando que,

F - Friabilidade do carvão (%);

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

P_i - Peso inicial do carvão (g).

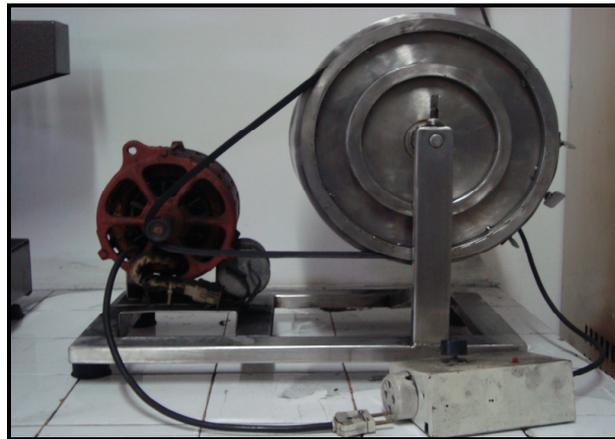


Figura 10. Tambor rotatório utilizado para determinação da friabilidade do carvão vegetal, Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da UFRA, Belém, PA.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As amostras, para cada sistema de carbonização, constituíram-se de 10 fornadas para determinação dos índices de conversão de resíduos de exploração florestal em carvão e 10 fornadas para a determinação de características físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal de resíduos de exploração florestal. E, para comparação das médias encontradas entre os tipos de fornos utilizou-se o Teste “t” para duas amostras independentes. Como condição

para realização deste teste estatístico realizou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (GOMES e GARCIA, 2002), utilizando-se o programa BioEstat 4.0 (AYRES *et al.*, 2005).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises das relações de medidas volumétricas de resíduos florestais e de carvão vegetal, propriedades físicas (densidade a granel, densidade aparente do carvão, poder calorífico), propriedade mecânica (friabilidade) e propriedades químicas (teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo) do carvão pelo teste de Shapiro-Wilk apresentaram normalidade nos dados.

4.1 DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM CARVÃO VEGETAL

4.1.1 Índice de enchimento do forno - IEF

Na determinação do IEF, verificou-se que o carregamento de resíduos no forno deixa em média 31% de vazios no forno rabo quente e de 38% de vazios no forno metálico. Pelo teste “*t*” de Student, as variações das médias observadas apresentaram-se diferentes ao nível de 95% de probabilidade (Tabela 4). Estas diferenças podem estar relacionadas, principalmente, à forma geométrica particular de cada tipo de forno, tendo em vista que o forno de alvenaria foi construído em formato semi-esfera e o forno metálico apresenta-se na forma cilíndrica, bem como associadas à tortuosidade dos pedaços de resíduos de exploração florestal que foram utilizados para carbonização.

Tabela 4. Comparação de médias da relação índice de enchimento do forno pelo teste 't' de Student (95% de probabilidade) entre o forno metálico e o forno de alvenaria, CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda./Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tipo de Forno	IEF
	VR_{m^3}/VNF_{m^3}
Forno Alvenaria	0,69a
Forno Metálico	0,62b

Médias com letras diferentes apresentam diferenças entre si, através do teste 't', a 95% de probabilidade. IEF: Fator de empilhamento; VR_{m^3} : Volume de resíduos m^3 ; VNF_{m^3} : Volume nominal do forno em m^3 .

4.1.2 Índices de conversão volumétrica - ICV

Em relação à conversão volumétrica, observou-se que é necessário em média $0,99 m^3$ de resíduo de exploração florestal para produzir 1,00 mdc no forno de alvenaria nas condições apresentadas por este estudo. E no forno metálico, em média, é necessário $1,15 m^3$ de resíduo para produção de 1,00 mdc. A análise estatística realizada, pelo teste 't' de Student, revelou que estes dados apresentam-se estatisticamente diferentes ao nível de 95% de probabilidade, conforme a Tabela 5, e comprovam que o sistema de carbonização interfere diretamente na produção de carvão, e, neste caso, o sistema de carbonização por meio do forno de alvenaria apresenta melhor relação VR_{m^3}/VC_{mdc} quando comparado com o forno metálico.

No que concerne à produção de carvão vegetal, o que se deseja de um sistema de carbonização é que apresente menor razão entre o volume de matéria-prima (m^3) por volume de carvão (mdc), também chamado de rendimento volumétrico.

No forno rabo quente constatou-se que se necessita 1,29 st de resíduos de exploração florestal para produzir 1,00 mdc de carvão vegetal e para o forno metálico registrou-se o volume de 1,59 st de resíduos para 1,0 mdc de carvão. Estes valores apresentam-se estatisticamente diferentes entre si pelo teste 't' de Student ao nível de 95% de probabilidade (Tabela 05). Estes resultados são diferentes dos obtidos por Colombo, Pimenta e Hatakeyama (2006), que analisaram madeiras de fustes de eucalipto, em fornos "rabo quente" e fornos cilíndricos verticais, encontrando a razão de volume de madeira (st) por metro de carvão (mdc) de 2,00 e 1,50 respectivamente, maiores que o encontrado neste trabalho para ambos os sistemas de carbonização. Portanto, as diferenças entre os resultados de Colombo e

colaboradores, e os deste trabalho podem estar associados à condução da carbonização, e, principalmente, nas matérias-primas (madeira de reflorestamento e resíduos de exploração florestal) que proporcionam diferentes comportamentos nos resultados na conversão pirolítica da madeira em carvão.

O índice de conversão, em relação ao volume nominal do forno (m^3) e o volume de carvão (mdc) podem ser observados na Tabela 5. No forno de alvenaria foi obtido 1,00 mdc de carvão em $1,44 m^3$ do forno, enquanto que no metálico a relação foi de 1 mdc em $1,84 m^3$. A análise estatística, pelo teste ‘t’ de Student, revelou que estes resultados apresentam-se estatisticamente diferentes ao nível de 95% de probabilidade, conforme a Tabela 05. Este índice pode estar sendo influenciado pela forma de empilhamento dos resíduos dentro dos fornos, uma vez, que o forno metálico apresenta mais espaços vazios dentro do que o forno de alvenaria, as formas geométricas particulares de cada forno e as diferenças acentuadas de tempos na carbonização que sofrem os dois sistemas de carbonização.

Tabela 5. Comparação das médias dos índices de conversão volumétricas pelo teste ‘t’ de Student (95% de probabilidade) entre o forno metálico e forno de alvenaria, CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda./Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tipo de Forno	ICV		
	VR_{m^3}/VC_{mdc}	VR_{st}/VC_{mdc}	VNF_{m^3}/VC_{mdc}
Forno Alvenaria	0,99 ^a	1,29 ^a	1,44 ^a
Forno Metálico	1,15 ^b	1,59 ^b	1,84 ^b

Médias com letras diferentes apresentam diferenças entre si, através do teste ‘t’, a 95% de probabilidade. ICV: índice de conversão volumétrica; VR_{m^3} : Volume de resíduos m^3 ; VNF_{m^3} : Volume nominal do forno em m^3 ; VC_{mdc} : volume de carvão em mdc (a granel); VR_{st} : volume de resíduos em metro estere; mdc: metro de carvão.

4.1.3 Índices de conversão em peso - ICP

Em relação à conversão em peso, no forno de alvenaria, verificou-se que $1 m^3$ de resíduos carbonizados gerou 0,243 ton. de carvão e no forno metálico, apenas 0,166 ton. O teste ‘t’ de Student indicou diferença significativa ao nível de 95% de probabilidade entre as médias obtidas (Tabela 6). Da mesma forma, no forno de alvenaria verificou-se que 1 st de resíduos carbonizados gerou 0,185 ton. de carvão e no forno metálico registrou-se 0,120 ton.

A comparação das médias pelo teste ‘t’ de Student, indicou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade entre as médias (Tabela 6).

Tabela 6. Comparação das médias dos índices de conversão em peso pelo teste ‘t’ de Student (95% de probabilidade) entre o forno metálico e forno de alvenaria, CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda./Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tipo de Forno	ICP	
	PC _{ton} /VR _{m³}	PC _{ton} /VR _{st}
Forno Alvenaria	0,243a	0,185a
Forno Metálico	0,166b	0,120b

Médias com letras diferentes apresentam diferenças entre si, através do teste ‘t’, a 95% de probabilidade. FE: ICP: índice de conversão em peso; VR_{m³}: Volume de resíduos m³; VNF_m: Volume nominal do forno em m³; VC_{mdc}: volume de carvão em mdc (a granel); VR_{st}: volume de resíduos em metro estere; mdc: metro de carvão.

4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO CARVÃO VEGETAL

4.2.1 Densidade a granel do carvão

As médias de densidade a granel (Dgr) do carvão vegetal encontram-se na Tabela 7. Constata-se que o carvão produzido pelo forno de alvenaria apresentou Dgr de 238,33 kg/m³, enquanto que o forno metálico produziu 189,00 kg/m³.

O teste ‘t’ de Student indicou haver diferença significativa ao nível de 95% de probabilidade, conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Comparação das médias de densidade a granel (Dgr) pelo teste ‘t’ de Student (95% de probabilidade) entre o forno metálico e o forno de alvenaria, CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda./Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tipo de Forno	Dgr (kg/m ³)
Forno Alvenaria	238,33a
Forno Metálico	189,00b

Médias com letras diferentes apresentam diferenças significativas entre si, através do teste ‘t’, a 95% de probabilidade.

O carvão produzido no forno de alvenaria apresentou densidade a granel superior ao carvão do forno metálico. Essa diferença pode ser decorrente provavelmente de três fatores que influenciam essa propriedade: diferente granulometria dos pedaços de carvão; carbonização acelerada no forno metálico, ocasionando, no final do processo, baixa massa residual e diferente densidade da madeira dos resíduos carbonizados em cada forno. Segundo Fontes (1989) o primeiro fator, granulometria do carvão, é o que mais influencia na densidade a granel do carvão.

4.2.2 Densidade básica do carvão

As médias de densidade básica do carvão produzido pelo forno metálico e forno de alvenaria podem ser observadas na Tabela 8. Constatou-se que o forno de alvenaria apresenta carvão mais pesado que o forno metálico, com valores de 0,51 g/cm³ e 0,42 g/cm³ respectivamente. A análise estatística de densidade básica do carvão mostrou haver diferença significativa entre os tipos de carbonização, pelo teste de ‘t’ de Student ao nível de 95% de probabilidade conforme observado na Tabela 8.

Tabela 8. Comparação de médias de densidade básica (Db) do carvão pelo teste ‘t’ de Student (95% de probabilidade) entre o forno metálico e forno de alvenaria, Cikel Brasil Verde Madeiras Ltda./Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tipo de Forno	Db (g/cm ³)
Forno Alvenaria	0,51a
Forno Metálico	0,42a

Médias com letras diferentes apresentam diferenças significativas entre si, através do teste ‘t’, a 95% de probabilidade.

Segundo Fontes (1989), a densidade do carvão está relacionada com a perda de massa com a contração volumétrica que sofre durante a carbonização. Este pode ser o principal fator que deve estar ocasionando uma maior perda de massa no processo de conversão dos resíduos de exploração florestal em carvão no forno metálico, tendo em vista, a sua acelerada carbonização. Outro fator, que pode estar associado, é a alta heterogeneidade de

espécies florestais que perfazem a produção de resíduos da empresa que, por conseguinte representam diferentes densidades de madeiras.

4.2.3 Poder calorífico superior do carvão

As médias do poder calorífico superior (PCS) do carvão produzido pelo forno metálico e forno de alvenaria podem ser observadas na Tabela 9. Constatou-se que o forno metálico apresenta carvão com maior poder calorífico que o carvão produzido no forno de alvenaria, com valores de 7187,08 kcal/kg e 6790,60 kcal/kg, respectivamente. Apesar do resultado obtido pelo forno metálico ser 6% maior que o resultado do forno de alvenaria, a análise estatística do poder calorífico mostrou não haver diferença significativa entre os tipos de carbonização pelo teste de ‘t’ de Student ao nível de 95% de probabilidade, conforme observado na Tabela 9.

Tabela 9. Comparação de médias do poder calorífico superior (PCS) do carvão pelo teste ‘t’ de Student (95% de probabilidade) entre o forno metálico e forno de alvenaria, CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda./Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tipo de Forno	PCS (kcal/kg)
Forno Alvenaria	6790,60a
Forno Metálico	7187,08a

Médias com letras iguais não apresentam diferenças significativas entre si, através do teste ‘t’, a 95% de probabilidade.

4.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CARVÃO VEGETAL

4.3.1 Teor de materiais voláteis.

As médias do teor de materiais voláteis (TMV) do carvão produzido pelo forno metálico e forno de alvenaria podem ser observadas na Tabela 10. Constatou-se que o forno de alvenaria apresentou menores teores de voláteis em relação ao forno metálico, 2,60 % e 3,16 % , respectivamente. A análise estatística do carvão mostrou não haver diferença

significativa entre os tipos de carbonização em relação ao teor de materiais voláteis, pelo teste de 't' de Student ao nível de 5% de probabilidade conforme observado na Tabela 10.

Tabela 10. Comparação de médias do teor de materiais voláteis (TMV) do carvão pelo teste 't' de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria, Cikel Brasil Verde Madeiras Ltda./Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tipo de Forno	TMV (%)
Forno Alvenaria	23,15a
Forno Metálico	20,74a

Médias com letras iguais não apresentam diferenças significativas entre si, através do teste 't', a 95% de probabilidade.

Esta diferença, apesar de pequena e não significativa representa em termos relativos 10,4%, e pode estar relacionada a acelerada carbonização que sofreu no forno metálico. Esta mesma tendência foi constatada por Santiago e Andrade (2005) e Andrade e Carvalho (1998), que verificaram que o teor de materiais voláteis diminui conforme o aumento da temperatura de carbonização.

4.3.2 Teor de cinzas

As médias do teor de cinzas (TCi) do carvão produzido pelo forno metálico e forno de alvenaria podem ser observadas na Tabela 11. Constata-se que o forno de alvenaria apresentou menor teor de cinzas em relação ao forno metálico, 2,60% e 3,16 %, respectivamente. Porém, a análise estatística do teor de cinzas do carvão mostrou não haver diferença significativa entre os tipos de carbonização, pelo teste de 't' de Student ao nível de 95% de probabilidade, conforme observado na Tabela 11. Estas diferenças podem estar relacionadas a fatores intrínsecos às espécies que deram origem ao carvão vegetal produzido, uma vez que o material utilizado representa uma mistura de mais de 15 espécies florestais extraídas pela empresa (ver Tabela 03).

Tabela 11. Comparação de médias do teor de cinzas (TCi) do carvão pelo teste “t” de Student (5%) entre o forno metálico e o forno de alvenaria, CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda./UFRA.

Tipo de Forno	TCi (%)
Forno Alvenaria	2,60a
Forno Metálico	3,16a

Médias com letras iguais não apresentam diferenças significativas entre si, através do teste ‘t’, a 95% de probabilidade.

Santiago e Andrade (2005) verificaram uma tendência de aumento no teor de cinzas conforme o aumento da temperatura, neste caso, a rápida carbonização que possivelmente sofreu o forno metálico, em decorrência da acelerada carbonização dos resíduos dentro do forno, pode justificar o maior valor do teor de cinzas em relação ao forno de alvenaria.

4.3.3 Teor de carbono fixo

As médias do teor de carbono fixo (TCF) do carvão produzido pelo forno metálico e forno de alvenaria podem ser observadas na Tabela 12. Constatou-se que o forno de alvenaria apresentou menores teores de carbono em relação ao forno metálico, 74,24 e 76,10 %, respectivamente. A análise estatística do carvão mostrou não haver diferença significativa entre os tipos de carbonização em relação ao teor de carbono fixo, pelo teste de ‘t’ de Student ao nível de 95% de probabilidade conforme observado na Tabela 12.

Tabela 12. Comparação de médias do teor de carbono fixo (TCF) do carvão pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria, CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda./Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tipo de Forno	TCF (%)
Forno Alvenaria	74,24a
Forno Metálico	76,10a

Médias com letras iguais não apresentam diferenças significativas entre si, através do teste ‘t’, a 95% de probabilidade.

Segundo Brito e Barrichello (1981) o teor de carbono fixo aumenta conforme o aumento da temperatura final de carbonização. Esta tendência pode ser observada nestes resultados, apesar de não haver diferenças significativas entre o forno metálico e o forno de alvenaria.

Os resultados encontrados para o teor de carbono fixo do carvão produzido em forno de alvenaria e forno metálico do presente estudo são muito próximos aos valores médios encontrados por Silva *et al.* (2007) que estudou resíduos de indústria madeireira colhidas na mesma área do presente estudo e Andrade e Carvalho (1998), que estudaram oito espécies florestais do estado do Rio de Janeiro.

4.4 PROPRIEDADE MECÂNICA DO CARVÃO VEGETAL

As médias do teste de friabilidade (F), também denominado de teste de tamboramento, do carvão vegetal produzido pelo forno metálico e forno de alvenaria podem ser observadas na Tabela 13. Constata-se que o forno metálico apresentou maior tendência de gerar finos do que o forno de alvenaria.

Em termos percentuais o forno metálico apresentou 12,6% a mais de finos do que o forno de alvenaria. A análise estatística do carvão mostrou não haver diferenças significativas entre os tipos de carbonização em relação à friabilidade do carvão pelo teste de ‘t’ de Student ao nível de 95% de probabilidade conforme observado na Tabela 13.

Tabela 13. Comparação de médias da resistência mecânica ou friabilidade do carvão pelo teste ‘t’ de Student (5%) entre o forno metálico e forno de alvenaria, Cikel Brasil Verde Madeiras Ltda./Universidade Federal Rural da Amazônia.

Tipo de Forno	Friabilidade
Forno Alvenaria	25,37a
Forno Metálico	29,05a

Médias com letras iguais não apresentam diferenças significativas entre si, através do teste ‘t’, a 95% de probabilidade.

É fato bem conhecido que o carvão vegetal é friável, sendo esta propriedade de alta preocupação para as pessoas envolvidas no seu processo de fabricação, transporte, estocagem, peneiramento e principalmente os seus consumidores finais (BRITO, 1993; FONTES, 1989).

A friabilidade do carvão vegetal para ambos os sistemas de carbonização é considerada bastante friável pela classificação do Centre Technique Forestier Tropical - CTFT (1972), que varia de 25 a 29% o que pode trazer perdas muito acentuadas se este carvão for transportado a longas distâncias.

5. CONCLUSÃO

Os dados experimentais obtidos permitem concluir que:

1- As tecnologias forno de alvenaria e forno metálico proporcionaram índices de enchimento do forno, de conversão volumétrica e de conversão em peso distintos para conversão dos resíduos em carvão vegetal. E para as condições em que foram desenvolvidos os estudos, o forno de alvenaria apresenta índices estatisticamente melhores do que os encontrados para o forno de metálico;

2 - O resultado da análise das propriedades físicas, químicas e mecânica do carvão não permite classificar quanto ao melhor carvão, devido não haver diferenças estatísticas entre o forno metálico e o forno de alvenaria, exceto para densidade a granel do carvão, onde os melhores resultados foram encontrados no forno de alvenaria;

3 - Em face da alta friabilidade do carvão dos dois sistemas de carbonização é desaconselhável o seu transporte a longas distâncias.

REFERÊNCIAS

AMS – Associação Mineira de Silvicultura. **Anuário Estatístico/2008**. MG, 2008. Disponível em: <<http://www.silv Minas.com.br/>>. Acesso em 20 de jan. 2009.

ANDRADE, A. M; CARVALHO, L. M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do estado do Rio de Janeiro. *Floresta e Ambiente*. v. 5, n. 1, p.24-42, jan./dez., 1998.

AQUINO, J. **Caracterização do carvão vegetal de resíduos de processamento primário da madeira de *Hymenolobium sp*, *Manilkara amazônica* (Huc.) Standl e *Hymenaea courbaril* L. e sua potencialidade no estado do Pará**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém – PA, 2003.

ARRUDA, T. P. M. **Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, 2005.

AYRES, M.; AYRES JÚNIOR, M.; AYRES, D. L.; SANTOS, A.A. S.. 2005. **BioEstat: Aplicações estatísticas nas áreas das ciências Bio-Médicas**. Belém: Imprensa Oficial do Estado do Pará, 324 p.

BALLONI, E. A.; MIGLIORINI, A. J.; BRITO, J.O. **Produção de energia através de florestas de rápido crescimento**. IPEF 1980. (Circular Técnica, 103).

BARROS. P. L. C. de; NUMAZAWA, S.; BARROS, D. S. **Quantificação de resíduos de exploração florestal e de árvores de queda natural em florestas manejadas na Amazônia: O caso Cikel Brasil Verde Madeiras Ltda**. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia, 42p., 2007. (Relatório Técnico, distribuição restrita).

BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. IPEF, 1993. (Circular Técnica n,181).

BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil. **Estudos avançados**. São Paulo, v.4, n.9. 1990.

BRITO, J. O. e BARRICHELLO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. **IPEF**, Piracicaba, v.2, n.5, p.1-25, 1981. (Série Técnica).

COLOMBO, S. F. O.; PIMENTA, A. P.; HATAKEYAMA, K. **Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável**. In.13º Simpósio de Engenharia e Produção, Anais, SP, Brasil, 2006. Disponível em:<www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/1208.pdf>. Acesso em 20 de jan. 2009.

CORREA, A. A. Conversão química de madeiras da Amazônia – carvão e briquetes de carvão vegetal. **Acta Amazônica**, 18, n. 1/2, p. 93-108, 1988

COUTINHO, A.R.; FERRAZ, E.S.B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperaturas de carbonização. **IPEF**, Piracicaba, n. 38, p. 33-37. 1988.

CTFT - Centre Technique Forestier Tropical. **Resultados de 20 estudos dos produtos da destilação das madeiras amazônicas**. BELÉM. 32 p. 1972.

FAO. **Métodos simples para fabricar carbón vegetal**. Roma, 1983. 154p. (Estudio FAO: Montes, 41). 1983.

FERREIRA, C. A.; SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; SANTOS, Á. F.; AZEVEDO, C. P.; LIMA, R. M. B.; NEVES, E. J. M.; ARAUJO, H. J. B. **Manejo florestal na Amazônia brasileira: situação atual e perspectivas**. Colombo - Paraná: Embrapa Floresta, 1999 (Série Técnica da Embrapa - Documentos).

FONTES, P. J.P. **Produção de carvão vegetal com oito espécies florestais da região amazônica em forno metálico**. Brasília. IBAMA/DIRPED/LPF. 1989, 21p. (Série Técnica, 10).

GRAÇA, L. R. e CAMPOS, C. H. O. Análise do aproveitamento econômico do resíduo florestal. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 13, p.35-45, dez. 1986.

PIMENTEL-GOMES, F. e GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativo**. Piracicaba, FEALQ, 2002. v.11, 309p.

LENTINI, M.; PEREIRA, D.; CELENTANO, D.; PEREIRA, R. **Fatos Florestais da Amazônia 2005**. Belém: Imazon. 141 p. 2005.

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

PASTORE, T. C. M.; OKINO, E. Y. A.; PASTORE Jr, F. **Carbonização de madeiras amazônicas, parte 1: Floresta Nacional do Tapajós**. IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, Brasília, D.F. 1989. 12p. (Série Técnica, 12).

SANTIAGO, A. R. e ANDRADE, A. M. Carbonização de resíduos de processamento mecânico de madeira de eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, p. 1-7, 2005.

SILVA, M. G. da; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M.M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVAO, G. R. . Carvão de resíduos de indústrias madeireiras de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas-PA. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007.

SUDAM/EMBRAPA. SNLCS. **Estudos climáticos do estado do Pará, classificação (Köppen) e deficiência hídrica (Thorntwaite, Mather)**. Belém: SUDAM/EMBRAPA. 1993. 53 p.

VALE, A. T.; ABREU, V. L. S.; GONÇALVEZ, J. C.; COSTA, A. F da. Estimativa do poder calorífico superior do carvão vegetal de madeiras de *Eucalyptus grandis* em função do teor de carbono fixo e do teor de materiais voláteis. **Brasil Florestal**, n.73, p.47-52, 2002.

VALE, A. T. e NOGUEIRA, M. Carbonização de madeiras do serrado e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, v.25, n.2, p.271-276, 2001.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALVES, J. C. e NOGUEIRA, M. Relações entre densidade básica da madeira e a qualidade do carvão vegetal de espécies do serrado. **Revista Árvore**, v.25, n. 1, p.89-95, 2001.

VALE, A. T.; MOURA, V.P. G. MARTINS, I. S. e PEREIRA, F. S. Influência da gomose e da procedência de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden nos rendimentos da carbonização e na qualidade do carvão vegetal. **Revista Árvore**, v.21, n.2, p.253-258, 1997.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro, IBGE. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 1991. 124 p.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M. e VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v.10, n.2, p.151-160, 1986.

WATRIN, O. Dos S.; ROCHA, A.M.A. **Levantamento da vegetação natural e do uso da terra no município de Paragominas (PA) utilizando imagens TM/LANDSAT**. Belém: Embrapa – CPATU. 1991. 40p. (Boletim de Pesquisa, 124).