



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO EMPREGO DO  
BAMBU DA ESPÉCIE *Bambusa vulgaris* Schard. COMO  
CARVÃO VEGETAL**

**TÂNIA MACHADO DE SOUZA COSTA**

Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau  
de Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientador:  
Dr. José Roberto Martinelli

São Paulo  
2004

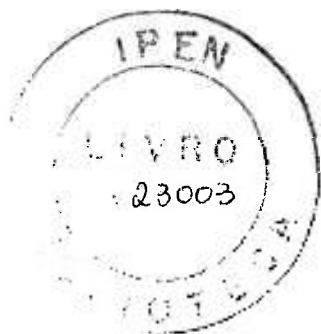


**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO EMPREGO DO BAMBU  
DA ESPÉCIE *Bambusa vulgaris* Schard. COMO CARVÃO VEGETAL**

**TÂNIA MACHADO DE SOUZA COSTA**



Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais.

Orientador:

Dr. José Roberto Martinelli

**São Paulo**

**2004**

*“exemplar revisado pelo autor”*

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO EMPREGO DO BAMBU  
DA ESPÉCIE *Bambusa vulgaris* Schard. COMO CARVÃO VEGETAL**

**TÂNIA MACHADO DE SOUZA COSTA**

Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau  
de Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear – Materiais.

Orientador:

Dr. José Roberto Martinelli

**São Paulo**

**2004**

## **DEDICATÓRIA**

À minha família e amigos em vida, e aos que se transformaram em energia, matéria que curiosamente pesquisamos, sentimos e amamos a cada renovação da vida pela vida, fortalecendo nossos sonhos e realizações com determinação.

## AGRADECIMENTOS

Ao estimado orientador, Dr. José Roberto Martinelli, pelo incentivo ao ingresso no mestrado, apoio, aconselhamentos na realização das incontáveis etapas, esforços e pela confiança em nós depositada.

Ao Prof. Dr. José Otávio Brito, Chefe do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, e Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), pelos exemplos, valiosos e pelo apoio de equipamentos para o desenvolvimento de parte das pesquisas deste trabalho, e aos técnicos Udemilson Ceribelli e Carolina de Moraes Potascheff.

Ao Prof. Anísio Azzini, do Departamento de Fibras, e ao Sr. Ricardo Marques Coelho, do Departamento de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas, pelo fornecimento, instruções e aconselhamento sobre a matéria-prima.

Ao Dr. Silvio Benedicto Alvarinho, pelo apoio e orientações no desenvolvimento de parte das pesquisas deste trabalho e no seminário de área.

Ao Prof. Dr. Antonio L. Beraldo, da Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, pelo apoio de equipamentos para o desenvolvimento de parte das pesquisas deste trabalho, e, em especial aos técnicos Jurandir Fagundes Carvalho, Gisleiva Cristina Ferreira e Flavia F. Vieira.

Ao Prof. Rubens Lamparelli, do Centro de Pesquisas de Meteorologia Aplicadas a Agricultura (CEPAGRI), da UNICAMP, pelo apoio no desenvolvimento de parte das pesquisas deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Efraim Cekinski, Diretor da Divisão de Química, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, e, em especial às Sra. Ligia Alves de Souza e Sra. Heloisa Antonoff.

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos Coelho e à Sra. Valquiria F.J. Kozievitch, do Laboratório LIMPSOL, do Instituto de Química da USP.

Ao Prof. Dr. Jivaldo do Rosário Matos, do Laboratório de Análises Térmicas “Prof. Dr. Ivo Giolito” – LATIG, do Instituto de Química da USP.

Ao Dr. José de Lima Albuquerque, do Programa de Pós-Graduação em Administração e desenvolvimento Rural - DLCH, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, pelo apoio nos materiais de vídeo de carvoaria.

À gerência do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial de São Paulo – SENAI/SP e ao meu chefe direto, pelos momentos de ausência.

A todos aqueles que tenham prestado alguma forma de colaboração e que, involuntariamente, tenham tido seus nomes aqui omitidos.

# **ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO EMPREGO DO BAMBU DA ESPÉCIE *Bambusa vulgaris* Schard. COMO CARVÃO VEGETAL**

**Tânia Machado de Souza Costa**

## **RESUMO**

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schard. como uma alternativa para a produção de carvão vegetal.

As amostras de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schard., com idade de dois anos, foram carbonizadas a 400 °C, 600 °C e 800 °C, em forno elétrico laboratorial. Foi utilizado como padrão comparativo, para verificação da viabilidade técnica do carvão, uma madeira de *Eucalyptus saligna*.

Estas amostras foram caracterizadas pela análise elementar, análise imediata, densidade, rendimento em massa e poder calorífico.

Os resultados mostraram que em escala de laboratório, a obtenção do carvão vegetal, a partir de carbonização do bambu da espécie *Bambusa vulgaris schard.* é viável, portanto podendo ser inclusive uma proposta para utilização em escala industrial.

**Technical Viability Evaluation of the Use of *Bambusa vulgaris* Schard.  
Bamboo specie for charcoal production**

**Tânia Machado de Souza Costa**

***ABSTRACT***

The present work evaluated the technical viability of the use of bamboo specie *Bambusa vulgaris* Schard. as a alternative raw material for charcoal production. *Bambusa vulgaris* Schard. samples were collected with 2 years of age, carbonized at 400<sup>0</sup>C, 600<sup>0</sup>C and 800 <sup>0</sup>C in an electrical furnace. Samples of wood specie *Eucalyptus saligna* were also prepared for comparison. Ultimate and approximate analyses were performed on samples to determine the bulk density, yield, moisture, ash amount, and heat of combustion.

The results showed that it is possible to produce charcoal from *Bambusa vulgaris* Schard. on a laboratory scale, and there is a possibility to extend that production in an industrial scale.



## SUMÁRIO

Página

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>2</b>
3.1 Origem da biomassa florestal.....	2
3.1.1 A radiação como fator ambiental.....	2
3.1.2 O ciclo nas plantas.....	2
3.1.2.1 Carbono.....	2
3.1.2.2 Nitrogênio.....	3
3.1.2.3 Nutrientes.....	4
3.1.3 Capacidade fotossintética nas plantas.....	4
3.2 Origem do bambu no mundo e no Brasil.....	4
3.2.1 Tipos e propagação vegetativa de bambu.....	5
3.2.2 Propagação vegetativa de bambu.....	7
3.2.3 Cultivo do bambu.....	8
3.2.4 Biomassa do bambu.....	9
3.3 Propriedades do bambu.....	10
3.3.1 Características biológicas e morfológicas dos colmos de bambu.....	10
3.3.2 Características anatômicas, físicas e químicas dos colmos de bambu.....	11
3.3.3 Características mecânicas dos colmos de bambu.....	12
3.4 Aplicabilidade do bambu.....	12
3.4.1 Vantagens na utilização do bambu.....	13
3.4.2 Desvantagens na utilização do bambu.....	14
3.5 Estudos de produção de carvão vegetal de bambu.....	14
3.6 Análise energética brasileira.....	16
3.6.1 Cadeia produtiva de carvão vegetal no Brasil.....	17
3.6.2 Consumo de carvão vegetal no Brasil.....	18
3.7 Considerações sobre o manuseio da madeira.....	20
3.7.1 Estoque de lenha.....	21
3.7.2 Preparo da lenha.....	21
3.7.3 Carregamento da lenha.....	21
3.8 Tipos de fornos de carbonização.....	21
3.8.1 Forno de alvenaria.....	22
3.8.2 Forno “container”.....	22
3.8.3 Pontos de controle da carbonização.....	23
3.8.4 Descarregamento do forno.....	23
3.9 Processo de carbonização.....	24
3.10 Termogravimetria.....	26
3.11 Carbonização da celulose.....	26
3.12 Carbonização da hemicelulose.....	27
3.13 Carbonização da lignina.....	27
3.14 Características de qualidade num carvão vegetal de madeira.....	27

<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
4.1 Seleção de espécies.....	30
4.2 Identificação da espécie.....	30
4.3 Coleta de material.....	31
4.4 Corte, moagem e transporte.....	32
4.5 Produção de carvão vegetal – carbonização.....	33
4.6 Caracterização da matéria-prima.....	34
4.6.1 Determinação da degradação térmica.....	34
4.6.2 Determinação da análise imediata.....	34
4.6.2.1 Teor de umidade.....	35
4.6.2.2 Teor de cinzas.....	35
4.6.2.3 Teor de materiais voláteis.....	35
4.6.2.4 Teor de carbono fixo.....	36
4.6.3 Determinação da análise química – extrativos totais, lignina e holocelulose.....	36
4.6.4 Determinação do rendimento.....	37
4.6.5 Determinação do poder calorífico superior.....	37
4.7 Análise estatística dos dados.....	38
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
5.1 Análise termogravimétrica.....	39
5.1.1 Análise termogravimétrica TG e DTG.....	39
5.1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial.....	41
5.2 Análise imediata.....	41
5.2.1 Teor de umidade.....	41
5.2.2 Teor de cinzas.....	45
5.2.3 Teor de materiais voláteis.....	47
5.2.4 Teor de carbono fixo.....	49
6.1 Análise química.....	51
6.2 Rendimento do carvão.....	53
6.3 Poder calorífico do carvão.....	55
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>58</b>
<b>8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
TABELA 1 - Taxas fotossintéticas máximas de algumas espécies	04
TABELA 2 - Biomassa anual de bambus (ton / secas ao ar /ha)	09
TABELA 3 - Estudos preliminares de produtividade silvicultural do <i>Bambusa vulgaris</i>	10
TABELA 4 - Análise química de <i>Bambusa vulgaris</i> , <i>Eucalyptus saligna</i> e <i>Pinus elliotti</i>	12
TABELA 5 - Rendimentos em carvão, licor pirolenhoso e gás não-condensável obtidos a partir de espécies de bambu (média de duas repetições)	15
TABELA 6 - Valores da densidade e poder calorífico do carvão de espécies de bambu	15
TABELA 7 - Rendimento dos produtos obtidos na carbonização de madeira.	28
TABELA 8 - Propriedades médias das características do carvão vegetal de madeira.	28
TABELA 9 - Análise imediata do carvão vegetal e rendimento em carbono fixo.	29
TABELA 10 - Teor de umidade, cinza, materiais voláteis e carbono fixo da matéria-prima.	42
TABELA 11 - Teor de umidade, cinza, materiais voláteis e carbono fixo do carvão.	42
TABELA 12 - Valores médios do teor de umidade do carvão da espécie <i>B. vulgaris</i> e da espécie <i>E. saligna</i>	44
TABELA 13 - ANOVA do teor de umidade das amostras estudadas	44
TABELA 14 - Valores médios do teor de cinzas do carvão da espécie <i>B. vulgaris</i> e da espécie <i>E. saligna</i>	46
TABELA 15 - ANOVA do teor de cinzas das amostras estudadas	46
TABELA 16 - Valores médios do teor de materiais voláteis do carvão da espécie <i>B. vulgaris</i> e da espécie <i>E. saligna</i>	48
TABELA 17 - ANOVA do teor de materiais voláteis das amostras estudadas	48
TABELA 18 - Valores médios do teor de carbono fixo do carvão da espécie <i>B. vulgaris</i> e da espécie arbórea <i>E. saligna</i>	50
TABELA 19 - ANOVA do teor de carbono fixo das amostras estudadas	50
TABELA 20 - Teor de extrativos totais, lignina e hemicelulose da matéria-prima	51
TABELA 21 - Valores médios da análise química da espécie <i>B. vulgaris</i> e da espécie arbórea <i>E. saligna</i>	52
TABELA 22 - ANOVA para análise química das amostras estudadas	52
TABELA 23 - Teor de rendimento gravimétrico dos carvões vegetais	53
TABELA 24 - Valores médios do rendimento do carvão da espécie <i>B. vulgaris</i> e da espécie <i>E. saligna</i>	54
TABELA 25 - ANOVA do rendimento das amostras estudadas	55
TABELA 26 - Poder calorífico superior da matéria-prima original dos carvões vegetais	55
TABELA 27 - Valores médios do poder calorífico da espécie <i>B. vulgaris</i> e da espécie arbórea <i>E. saligna</i>	57
TABELA 28 - ANOVA do poder calorífico das amostras estudadas	57

## LISTA DE FIGURAS

Página

FIGURA 1 – Representação gráfica do bambu datada de 2.600 a.C. (Lopez, 1974).....	5
FIGURA 2 – Desenho esquemático da estrutura básica do bambu do grupo entouceirante adaptado com fotos (Hidalgo Lopez, 1974). .....	6
FIGURA 3 – Sistema radicular de bambu do grupo alastrante (Hidalgo Lopez, 1974). ....	7
FIGURA 4 – Oferta Interna de Energia do período de 1970 a 2002 (Balanço Energético Nacional, 2003).....	16
FIGURA 5 – Consumo setorial de biomassa do período de 1970 a 2002 (BEN, 2003). ....	17
FIGURA 6 – Origem da matéria-prima usada para produção de carvão vegetal, no Estado de São Paulo, citada no Relatório Pró-Carvão (Brito, 2000).....	19
FIGURA 7 – Gráfico dos consumidores de carvão vegetal nos setores industrial, residencial, comercial e agropecuário (BEN, 2003). .....	20
FIGURA 8 – Tipos de fornos de alvenaria: (a) rabo quente, (b) forno de encosta e (c) forno de meio encosta (Brito, 2000). .....	22
FIGURA 9 – Desenho esquemático do forno “container” adaptado do vídeo como produzir carvão para churrasco, do Centro de Produções Técnicas - CPT (Oliveira, 2000).....	23
FIGURA 10 – Fluxograma das etapas do processo de carbonização da madeira adaptado do “Guide Technique de la Carbonization” (Briane & Doat, 1985). .....	25
FIGURA 11 – Touceira de bambu da espécie <i>Bambusa vulgaris</i> Schrad. do viveiro do IAC (Campinas, 2001).....	30
FIGURA 12 – Imagem de satélite “Quick Bird” obtida em abril de 2002, do local de coleta da <i>B. vulgaris</i> (Campinas, 2003). .....	31
FIGURA 13 – Desenho adaptado do corte dos segmentos de colmos de <i>B. vulgaris</i> pertencente ao viveiro do IAC (Campinas, 2001). .....	32
FIGURA 14 – (a) ferramenta de corte; (b) processo de corte e (c) cavacos dos colmos de <i>B. vulgaris</i> (UNICAMP, 2003) .....	33
FIGURA 15 – Curva TG/DTG, aquecimento de 10°C/min sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> sintético (50 mL/min), da serragem do <i>B. vulgaris</i> (LATIG, 2003). .....	39
FIGURA 16 – Curva TG/DTG, aquecimento de 10°C/min sob atmosfera dinâmica de ar sintético (50 mL/min), da serragem do <i>B. vulgaris</i> (LATIG, 2003). .....	40
FIGURA 17 – Curva DSC da serragem do <i>B. vulgaris</i> (LATIG, 2003). .....	41
FIGURA 19 – Teor de umidade dos carvões. ....	43
FIGURA 20 – Teor de cinzas dos carvões. ....	45
FIGURA 21 – Teor de materiais voláteis dos carvões. ....	47
FIGURA 22 – Teor de carbono fixo dos carvões. ....	49
FIGURA 23 – Teor de extrativos totais, lignina e holocelulose obtidos na análise química. ....	51
FIGURA 24 – Rendimentos dos carvões. ....	54
FIGURA 25 – Poder calorífico dos carvões. ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS

a.C. – Antes de Cristo

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

APP - Área de Preservação Permanente

BEN – Balanço Energético Nacional

CEPAGRI - Centro de Pesquisas de Meteorologia Aplicadas a Agricultura

CFCs – Clorofluorcarbonetos

CHU – Bambu

CV – Coeficiente de variação (medida relativa de dispersão)

$\sigma$  – Desvio padrão

ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

g.l – Grau de liberdade

IAC - Instituto Agrônomo de Campinas

IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

kJ – Quilojoules

LATIG - Laboratório de Análises Térmicas “Prof. Dr. Ivo Giolito”

LIMPSOL – Laboratório de Matérias-Primas e Sólidos não Metálicos

MPa – Mega pascal

SEBRAE – Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas de São Paulo

*TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry*

Temp. – Temperatura

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

## 1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é um produto resultante do processo de termodegradação da madeira na presença de calor, processo esse chamado de carbonização. No entanto, quando se realiza uma destilação seca, obtém-se outros produtos gasosos e líquidos, tais como o licor pirolenhoso e alcatrão, que podem ser utilizados como enriquecedor de solos na área agrícola.

Conforme referência bibliográfica (Mello, 2001) a utilização do carvão vegetal remonta ao século XI, nas forjas catalãs, onde eram utilizados como redutores de minério de ferro. No Brasil, a aplicação iniciou-se em 1587 na indústria de ferro, para fabricação de cravos, ferramentas e utensílios. Mas foi em 1813, na cidade de Sorocaba, que se produziu o primeiro ferro-gusa, na Real Fábrica de Ferro de São João de Ipanema, e, desde então, o carvão vegetal vem sendo distribuído e consumido no setor siderúrgico, e, em menor escala, nos setores residenciais e comerciais.

No Balanço Energético Nacional de 2003, os segmentos que são mais significativos como consumidores do carvão vegetal são as indústrias de fabricação de ferro-gusa e aço, ferro ligas, cimento, não ferrosos, seguidos dos setores residenciais e comerciais.

A qualidade do carvão vegetal está intimamente ligada a parâmetros como composição química, densidade, higroscopicidade, rendimento, teor de carbono fixo e resistência mecânica.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica do uso da espécie *Bambusa vulgaris* Schard. como matéria-prima para a obtenção de carvão vegetal, considerando a matriz de biomassa florestal brasileira, a alta produtividade relativa desta biomassa, a facilidade do cultivo e corte do bambu com poucas exigências em relação ao solo e clima em comparação com um carvão vegetal produzido a partir da carbonização do *Eucalyptus saligna*.

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

#### **3.1 Origem da biomassa florestal**

##### **3.1.1 A radiação como fator ambiental**

Toda a vida na Terra é mantida por um fluxo de energia proveniente do Sol e que passa pela biosfera, sendo que a Terra recebe anualmente  $700 \text{ W/m}^2$  de energia. Por meio do processo fotossintético, a energia radiante é fixada em energia química potencial, utilizada por todos os componentes da cadeia alimentar que participam dos processos vitais. A radiação é também a fonte primária de energia para reposição da matéria orgânica consumida na cadeia alimentar e condiciona, regulando o balanço hídrico e o balanço de energia da Terra, um cenário favorável à vida dos organismos.

A energia radiante que chega até a superfície da Terra é muito dependente dos movimentos de rotação e translação, os quais impõem um ritmo climático periódico, regendo muitos processos de desenvolvimento vegetativo, como, por exemplo, a germinação, o crescimento direcionado e a forma externa da planta.

Em média, 45% da radiação proveniente do Sol situa-se em uma faixa espectral de 380-710 nm, a qual é utilizada para a fotossíntese das plantas, conhecida como radiação fotossinteticamente ativa, frequentemente definida na faixa de 400-700 nm. Próximas a esta faixa estão a radiação ultravioleta com comprimentos curtos (UV – A, 315-380 nm e UV – B, 280 – 315 nm) e radiação infravermelha com comprimentos longos (IV 750 – 4.000 nm). As plantas também absorvem radiação infravermelha (comprimentos longos de 4.000 – 100.000 nm) e emitem comprimentos de ondas semelhantes. Estes dados foram comprovados por meio do mapeamento da cobertura vegetal acompanhados pelas imagens de *Landsat TM* (Rezende, 2000).

##### **3.1.2 O ciclo nas plantas**

###### **3.1.2.1 Carbono**

O modelo conceitual para representar o ciclo de carbono considera os diversos componentes de armazenagem e os fluxos entre eles. Pela fotossíntese, a energia radiante é absorvida e transformada em energia de ligação química e os 479 kJ de energia química são fixados por cada átomo-grama de carbono assimilado. A assimilação do carbono é resultado dos processos fotoquímicos dirigidos pela luz, processos enzimáticos não dependentes da radiação (as chamadas reações do escuro) e os processos de difusão, que são trocas de dióxido de carbono e oxigênio entre o cloroplasto e a atmosfera (Lancher, 2000).

Em etapas sucessivas, os fluxos das moléculas de carbono retornam aos demais componentes do sistema ambiental, inclusive integrando a sedimentação da biomassa, transformação em jazidas petrolíferas e carboníferas e a formação de rochas carbonatadas. O ciclo do carbono na grandeza dos ecossistemas e a interação com a atmosfera e recursos hídricos ocorrem em período temporal relativamente curto.

As trocas de  $\text{CO}_2$  sucedem-se sob contínua mudança dos fatores externos. Os processos fotoquímicos reagem primeiramente em função da disponibilidade de radiação. Por outro lado, os processos bioquímicos são influenciados pela temperatura e pela disponibilidade de água e minerais. A entrada de  $\text{CO}_2$  na folha, através dos estômatos, é limitada, sobretudo pelas conseqüências da diminuição do potencial hídrico. O principal fator ambiental que determina a intensidade respiratória é a temperatura. Atualmente, tem sido liberada uma quantidade de  $\text{CO}_2$  maior que a capacidade de absorção das plantas e árvores. O aumento da quantidade de  $\text{CO}_2$  que se acumula na atmosfera, bloqueando a saída da radiação quente para o espaço e retornando esta radiação, causa o chamado “efeito estufa”. Emissões tóxicas ambientais, como o metano, óxido de nitrogênio e os clorofluorcarbonetos (CFCs) contribuem também para o efeito estufa e prejudicam todas as etapas das trocas gasosas de  $\text{CO}_2$  (Rezende, 2000).

### 3.1.2.2 Nitrogênio

O modelo conceitual para representar o ciclo de nitrogênio propõe que o principal reservatório de nitrogênio da Terra é a atmosfera, contendo cerca de 78% desse gás ( $\text{N}_2$ ). As plantas não utilizam o nitrogênio diretamente do ar, mas o fazem consumindo os íons de amônia e os de nitrato. Ampla gama de bactérias pode converter o gás nitrogênio para a forma de amônia, no processo biológico conhecido como fixação do nitrogênio (Lancher, 2000).

Entre o abastecimento de nitrogênio e o aumento de biomassa há uma estreita relação, visto que a fotossíntese depende de compostos contendo nitrogênio (por exemplo, clorofila), para o crescimento de massa da planta. Na deficiência deste, a planta desenvolve-se em menor tamanho e acarreta menor produção de matéria seca.

Além do processo de fixação biológica, há a contribuição dos processos industriais, relâmpagos e processos de fixação atmosférica do nitrogênio. Após o processo de fixação, ocorrem os fluxos pelos vegetais e animais, em retroalimentação, para a atmosfera por meio do processo de desnitrificação.



### 3.1.2.3 Nutrientes

O balanço de minerais e o balanço de carbono nas plantas são interdependentes. A absorção de minerais coordena o crescimento agindo no acúmulo de biomassa vegetal, e na assimilação do carbono, tornando disponível o material no qual os minerais serão incorporados.

### 3.1.3 Capacidade fotossintética nas plantas

A máxima fixação do CO<sub>2</sub> sob condições naturais, é uma característica constitutiva de determinados grupos ou tipos de plantas. Essa capacidade de trabalho fotossintético é chamada de capacidade fotossintética.

No reino vegetal há grandes diferenças entre seus diversos componentes em relação à capacidade fotossintética. Num apanhado geral sobre os grupos ecofisiologicamente distintos (TAB.1), no qual são mostradas as taxas fotossintéticas máximas de algumas espécies selecionadas, e dentre elas, o bambu (Lancher, 2000).

TABELA 1 – Taxas fotossintéticas máximas de algumas espécies.

Grupo Vegetal	Fixação do CO <sub>2</sub>
	$\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ *
Plantas lenhosas	
Plantas cultivadas de clima tropical	10 -15
Espécies do cerrado	6,5 –14 (20)
Palmeiras	4 – 10 (20)
<b>Bambus</b>	<b>4 – 6</b>

FONTE: Lancher (2000).

\* Para comparar a capacidade fotossintética de diferentes tipos de plantas, a taxa de fotossíntese foi padronizada por unidade de área. A área de superfície é aquela que recebe a radiação e não a área total do órgão assimilador.

## 3.2 Origem do bambu no mundo e no Brasil

Alguns autores mencionam a origem do bambu na era Cretácea, um pouco antes do início da era Terciária, quando há indícios do aparecimento do homem. Os chineses, em 2.600 a.C., já representavam graficamente o bambu por dois talos com ramas, e o denominavam CHU (FIG.1).

O bambu é classificado como uma espécie não arbórea do reino vegetal pertencente à família gramínea, com aproximadamente 45 gêneros e mais de mil espécies espalhadas pelo mundo, sendo que atualmente a maior biodiversidade de bambu está localizada nos continentes Asiático, Americano e Africano (Hidalgo Lopez, 1974).



FIGURA 1 – Representação gráfica do bambu datada de 2.600 a.C. (Lopez, 1974).

No Brasil, a maioria das espécies de bambus foi trazida pelos portugueses na época da colonização. Os portugueses introduziram as espécies tropicais exóticas, sendo as mais comuns: a *Bambusa vulgaris* (bambu-verde), *Bambusa vulgaris* variedade *vittata* (bambu imperial), *Bambusa tuldoides* (bambu comum), *Dendrocalamus giganteus* (bambu gigante ou bambu balde) e *Dendrocalamus latiflorus*.

Conforme Salgado (1994), as espécies nativas de bambus crescem associadas com a floresta. As espécies nativas conhecidas são: Cambaúba (região Centro e Norte de Minas Gerais), Cana-Brava (região de Minas Gerais, município de Uberaba), Taboca, Cana-Brava-do-Mato, Ubá (região de Pernambuco), Taquara (região de Minas Gerais no Triângulo Mineiro e Goiás), Taquaruçú (região da Amazônia e Mato Grosso do Sul).

Mais recentemente, imigrantes japoneses trouxeram algumas espécies alastrantes típicas de clima temperado pertencentes ao gênero *Phyllostachys*, conhecidas mais popularmente como bambu chinês. Esta espécie é muito utilizada na fabricação de móveis, artigos de lazer e em paisagismo.

### 3.2.1 Tipos e propagação vegetativa de bambu

Os tipos de bambus são classificados quanto ao crescimento de rizomas, ou seja, o bambu é uma planta rizomatosa constituída por três estruturas básicas: uma região constituída pelos colmos, e duas subterrâneas constituídas pelas raízes e rizomas (FIG.2).

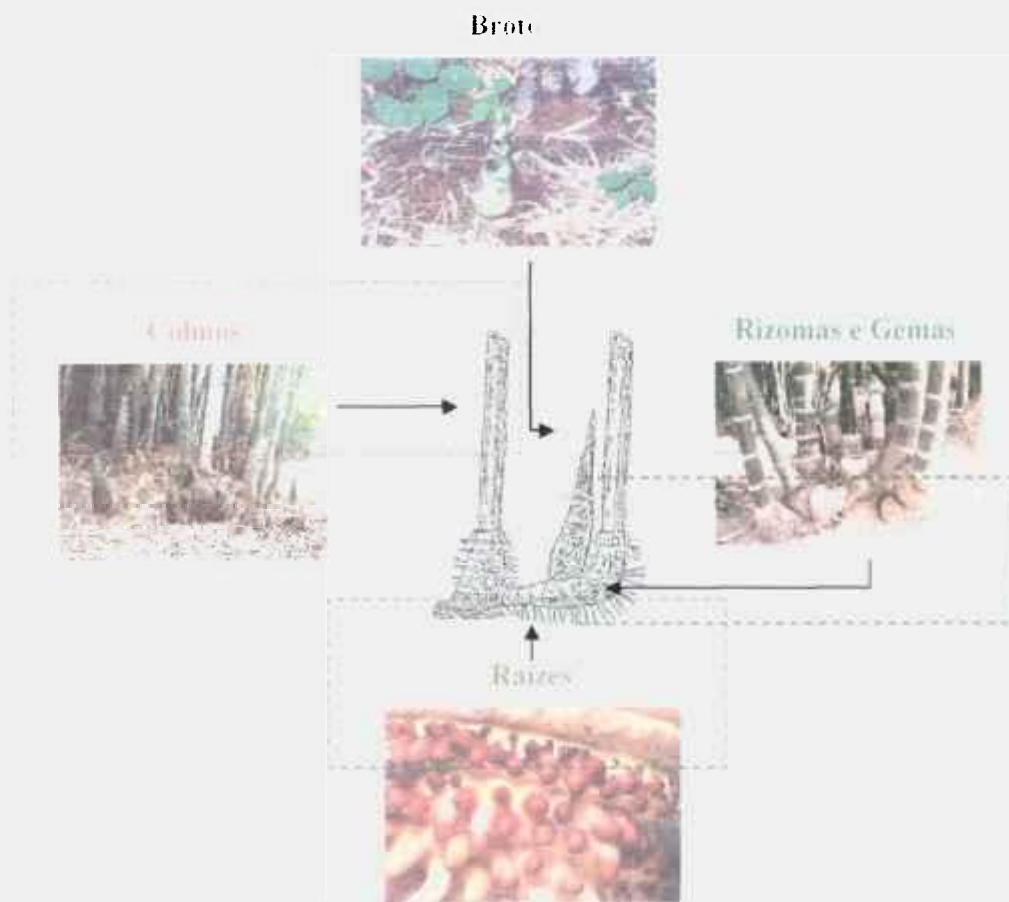


FIGURA 2 – Desenho esquemático da estrutura básica do bambu do grupo entouceirante adaptado com fotos (Hidalgo Lopez, 1974).

O rizoma é o elemento básico da touceira, responsável pela propagação e interligação dos colmos; são estruturas axiais segmentadas, constituídas alternadamente por nós e internós. Os rizomas são caracterizados pela presença de raízes, bainhas e gemas laterais solitárias em forma de círculo ou de semi-esfera, que só se desenvolvem em novos rizomas e, conseqüentemente, em novos colmos (Beraldo & Azzini, 2004).

Os novos rizomas crescem horizontalmente por curta distância e logo seu ápice se volta para cima formando um colmo. As espécies entouceirantes são menos resistentes ao frio do que as espécies alastrantes, não apresentando um bom desenvolvimento a baixas temperaturas, apresentando folhas queimadas em razão das geadas, e que pode provocar a morte dos brotos.

Os alastrantes são bambus mais tolerantes ao frio, incluindo os gêneros *Phyllostachys* e *Arundinaria*. São conhecidos também como monopodiais ou traçante; os seus rizomas são cilíndricos ou quase cilíndricos, possuindo diâmetro menor do que os

colmos aos quais dão origem, com internódios mais compridos que esses, simétricos, raramente sólidos, ocos, porém interrompidos em cada nó por um diafragma (FIG.3).



*FIGURA 3 Sistema radicular de bambu do grupo alastrante (Hidalgo Lopez, 1974).*

Em cada um dos nós dos rizomas existe uma gema solitária que permanece temporária ou permanentemente dormente. A maioria das gemas que se ativam, brotam produzindo colmos espaçados, e umas poucas produzem novos rizomas. Os rizomas se ramificam lateral ou monopodialmente percorrendo consideráveis distâncias, formando um sistema de redes entrelaçadas (Salgado, 1994).

### **3.2.2 Propagação vegetativa de bambu**

Diferentemente dos demais grupos vegetais, os sistemas de classificação de bambus não se baseiam em suas características florais, uma vez que os períodos de floração do bambu variam de 20 a 80 anos ou mais. Os fatores envolvidos e responsáveis pelo florescimento dos bambus não são conhecidos, o que dificulta o trabalho dos taxonomistas na identificação de espécies. Geralmente quando as espécies florescem, morrem logo depois (Alberini, 1979).

A propagação vegetativa do bambu por sementes está diretamente ligada à floração, pois as sementes são obtidas após o florescimento. No entanto, os fatores fisiológicos, climáticos e as pragas dificultam a obtenção de sementes com padrões semelhantes. Alguns países da Ásia estão realizando a propagação sexuada, com o

cruzamento entre espécies, formando bambus híbridos com melhor performance agronômica, tecnológica e econômica, possibilitando uma produção em larga escala.

A propagação vegetativa mais utilizada para bambus é a assexuada, onde a vantagem está em obter-se plantas clonais com uniformidade genética fenotípica, a partir do enraizamento de estacas providas de gemas primárias. A propagação vegetativa do bambu pode ser obtida por transplante total ou parcial para pequenos plantios, por pedaços de rizoma com raízes utilizado mais em espécies alastrantes, e para espécies entouceirantes utilizam-se pedaços de segmentos de colmos contendo gemas brotadas ou não (Beraldo & Azzini, 2004).

### 3.2.3 Cultivo do bambu

Plantações de bambus são encontradas em regiões ao nível do mar, tropicais e montanhosas (altitudes de aproximadamente 1.300 metros). Entre as inúmeras vantagens no cultivo do bambu, está a sua pouca exigência com relação ao solo. Produz bem em quase todos os tipos de solo, mas tem o seu maior desenvolvimento vegetativo em solos arenosos e leves com elevado teor de matéria orgânica e boa drenagem, essencial para o ciclo de vida vegetativa de espécies tropicais. Em regiões pantanosas, com ocorrência de encharcamento acentuado, o bambu não se desenvolve. O bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schard. está sendo cultivado em larga escala nos Estados do Maranhão, Pernambuco e Paraíba, onde os solos são ácidos e com baixa fertilidade (Beraldo & Azzini, 2004). As chuvas, por sua vez, desempenham papel de grande relevância, visto que o bambu é um grande consumidor de água e nutrientes. Conforme dados científicos, o nível de precipitação pluviométrica nas quais os bambus apresentam melhor desenvolvimento é em regiões com 1.300 a 1.400 mm por ano (Alberini, 1979).

Esta cultura não necessita de replantio e permite cortes periódicos a cada dois anos. Após cada corte, surgem novas perfilações, que induzem a formação de rizomas. Cada rizoma abriga um número variado de gemas que vão germinar e formar novas perfilações ou hastes.

Em regiões de clima quente, o bambu deixa cair suas folhas no verão e, assim, reduz a fotossíntese, economizando energia. Em épocas mais amenas, com folhagem plena, ocorre o contrário, e os bambuzais inundam o ar com oxigênio. Estudos demonstram que os bambuzais oxigenam quatro vezes mais a atmosfera do que as florestas tropicais (Lancher, 2000).

Bem poucas são as pragas e doenças que atacam o bambu. Dentre as pragas, a mais importante é o caruncho de bambu, *Dinoderus minutus*, que causa danos em bambus já cortados. A intensidade dos danos varia conforme a espécie, idade dos colmos, época de colheita e tratamentos aplicados. Outra praga capaz de causar danos é a broca do bambu, *Rhinastus latisternus*, um besouro cujas larvas bloqueiam a circulação da seiva nos colmos, tornando o cultivo do bambu impraticável em algumas regiões (Hidalgo Lopez, 1974).

### 3.2.4 Biomassa do bambu

Algumas biomassas são muito atrativas como fonte potencial de energia, pois podem exibir altas velocidades de crescimento e facilidades de plantio e colheita. Para a maioria das biomassas de alta umidade, o principal atrativo para a sua utilização é a alta produtividade em termos de matéria seca por hectare por ano. Podemos citar as gramíneas forrageiras como um bom exemplo, lembrando que o bambu também pertence a esta família.

A biomassa do bambu depende da espécie botânica, da qualidade do solo, do tipo do solo, do clima, entre outros fatores. A produtividade pode variar entre 50 a 100 ton/ha/ano, dependendo da espécie e condições locais. Por exemplo, a espécie *Phyllostachys edulis* tem uma biomassa (verde) aproximada de 56 ton/ha/ano distribuídos em 78% nos colmos, 15% nos galhos e 7% nas folhagens (Liese, 1985). A TAB.2 indica alguns exemplos de biomassa (seca) por espécies em diferentes condições ecológicas.

TABELA 2 – Biomassa anual de bambus (ton/seca/ha)\*

<b>Materiais</b>	<b>Localidade</b>	<b>ton/seca/ha</b>
<i>Bambusa tulda</i>	India	3
<i>Dendrocalamus strictus</i>	India	3,5
<i>Melocanna baccifera</i>	India	4
<i>Melacanna bambusoides</i>	Bangladesh	10 - 13
<i>Phyllostachys bambusoides</i>	Japão	10 - 14
<i>Phyllostachys edulis</i>	Japão	5 - 12
<i>Phyllostachys edulis</i>	Taiwan	8 - 11

FONTE: Liese (1985).

\* A fonte desta tabela não indica o período de crescimento.

Dados obtidos a partir dos estudos realizados por Gomide (1986a), sobre a produtividade silvicultural do bambu, da espécie *Bambusa vulgaris*, para plantio comercial na região de Santo Amaro, no Estado da Bahia são apresentados na TAB.3.

TABELA 3 – Estudos preliminares de produtividade silvicultural do *Bambusa vulgaris*.

Parcelas Experimentais			Teor de Umidade dos Colmos	Produção (peso seco)	
Nome	Rotação / Idade	Área (ha)	(%)	ton / ha	ton / ha / ano
Capanema 1	2ª / 1 ano	0,218	53,36	11,72	11,72
Capanema 2	2ª / 2 anos	0,164	53,07	21,75	10,87
Subaé 1	3ª / 1 ano	0,273	53,76	7,11	7,11
Subaé 2	3ª / 2 anos	0,136	52,72	19,81	9,90
Média	-	-	53,23	-	9,90

FONTE: Gomide (1986a).

Na TAB.3. a produtividade média do bambu foi determinada como 9,90 ton/ha/ano, em plantios de bambu em fileiras contínuas separadas por espaçamentos de cerca de 7 metros, formando amplos corredores, que podem ser melhor aproveitados.

Há situações peculiares como o exemplo da indústria Itapagé, do grupo João Santos, situada em Pernambuco, que realiza o plantio da *Bambusa vulgaris* em linhas, com espaçamento de 5 metros por 10 de rua, divididas em quadras, como um tabuleiro de xadrez, conseguindo uma produtividade média de 25 ton / ha / ano (Globo Rural, 1999).

### 3.3 Propriedades do bambu

#### 3.3.1 Características biológicas e morfológicas dos colmos de bambu

Beraldo & Azzini (2004), constataram:

*“A principal característica biológica do bambu está relacionada com o desenvolvimento dos colmos, os quais se reproduzem anualmente, aumentando suas dimensões até atingir o limite da espécie, quando encontra condições ambientais favoráveis. Embora a touceira de bambu seja perene, o ciclo de vida dos colmos depende da espécie considerada. Para a espécie *Bambusa vulgaris*, o ciclo vegetativo dos colmos é de, aproximadamente, sete anos, contrastando com os da espécie *D. giganteus*, com cerca de 20 anos.*

*Os colmos de bambu são estruturas segmentadas constituídas, de uma forma simples, por nós e internódios, sendo os internódios uma estrutura oca. Essa composição estrutural confere aos colmos de bambu elevada resistência mecânica, leveza e flexibilidade. A quantidade de nós, internódios e vazios existentes nos colmos de bambu varia, principalmente, com a espécie e diâmetro dos colmos”.*

### **3.3.2 Características anatômicas, físicas e químicas dos colmos de bambu**

Beraldo & Azzini (2004), constataram as seguintes características anatômicas:

*“As propriedades dos colmos de bambu estão intimamente relacionadas com a estrutura anatômica apresentada pelos nós e internódios. Basicamente, os colmos de bambu são constituídos por feixes fibrovasculares circundados por um tecido parenquimatoso rico em substâncias de reserva, na forma de amido. As células do tecido parenquimatoso, as fibras e os vasos são os principais elementos anatômicos existentes nos colmos”.*

Os principais constituintes químicos dos colmos de bambu são a celulose, holocelulose e lignina (carboidratos) e, em menor escala, estão presentes as resinas, tanino (ácido tânico), ceras e sais orgânicos. Esta composição química varia de acordo com a espécie, com as condições de crescimento das touceiras, com a idade dos colmos e regiões do colmo, conforme o bambu vai se desenvolvendo até chegar a sua maturidade. Depois do desenvolvimento total do colmo a composição química do bambu tende a permanecer constante.

As estações influenciam na composição química, principalmente, na quantidade de extrativos totais. Os nós contêm menos extrativos totais, pentosanas, cinzas e lignina, mas há mais celulose nos internós. As cinzas obtidas (1 a 5%) apresentam-se em maior quantidade nos internós do que nas camadas mais externas do bambu. Na média, a sílica obtida varia de 0,5 a 4%, sendo presente em porcentagem maior na base. A sílica afeta as propriedades da polpação do bambu (Liese, 1985).

Quando se analisa quimicamente os bambus e as madeiras, obtêm-se diferenças marcantes, como demonstrado na TAB.4.

Conforme referência bibliográfica de Beraldo e Azzini (2004):

*“Os elevados teores de pentosana, de solubilidade em soda a 1% e em água quente, evidenciam a presença de amido nos colmos de bambu”.*



TABELA 4 – Análise química de *Bambusa vulgaris*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliotti*

<b>Determinações</b>	<b><i>Bambusa vulgaris</i> (%)</b>	<b><i>Eucalyptus saligna</i> (%)</b>	<b><i>Pinus Elliotti</i> (%)</b>
Celulose	49,20	54,60	55,50
Lignina	14,50	25,50	26,00
Pentosanas	22,30	16,40	7,10
Solubilidade em soda a 1%	33,40	14,80	16,90
Solubilidade em água quente	15,00	1,60	3,80
Solubilidade em álcool-benzeno	5,20	1,40	6,70
Cinzas	1,80	0,30	0,30

FONTE: Gomide et al. (1988).

### 3.3.3 Características mecânicas dos colmos de bambu

Os colmos de todas as espécies de bambu são tão firmes quanto elásticos e flexíveis, ricos em sílica. Nos nós dos bambus, encontram-se cadeias de sílicas; os internós possuem uma estrutura oca. Essa composição estrutural confere aos colmos de bambu elevada resistência físico-mecânica tais como resistência a tração, à compressão, à flexão e ao cisalhamento; também possuem leveza e grande flexibilidade, que variam de acordo com as quantidades de nós, internos e vazios existentes nos internós, conforme a espécie, idade e dimensões dos colmos.

### 3.4 Aplicabilidade do bambu

Segundo Azzini et al. (1997), a utilização do bambu é conhecida há milênios pelos povos asiáticos e mais recentemente por alguns países latino-americanos. Segue-se uma relação da aplicação do bambu nesses países:

- Fazenda: cercados de animais, jacás para transporte de mudas de plantas e cercas;
- Construção civil: andaimes, caibros, ripados, batentes de portas e até telhas, sendo utilizado na construção de casas, prédios e pontes;
- Artesanato: molduras de quadros, balanços, cúpulas para abajures e cestarias;
- Alimentos: substitui o palmito e o aspargo;
- Paisagismo: com finalidades ornamentais;
- Medicina natural: o rizoma do bambu é antídoto para substâncias tóxicas; *Bambusa vulgaris* é anti-hemorragica; brotos de bambu são digestivos;

- Bioindicadores de impacto ambiental (por exemplo: metais pesados);
- Armamento: lanças usadas em guerras, facas, punhais;
- Música: Flautas e percussão;
- Utensílios domésticos: garfos, facas, colheres; e
- Atividades esportivas: vara-de-pesca, arco e flecha.

Atualmente, o bambu vem sendo estudado pelos pesquisadores de diversas áreas como matéria-prima industrial, demonstrando várias possibilidades de utilização (Beraldo & Azzini, 2004), como por exemplo:

- Fibras celulósicas para papel;
- Produção de amido ou etanol;
- Broto comestível;
- Material para construções rurais e para construções civil – concreto leve;
- Painéis laminados colados e compensados;
- Telhas fabricadas com fibras de bambu, cimento e areia;
- Tubos para condução de água;
- Móveis, artesanato e paisagismo;
- Carvão vegetal.

O bambu da espécie *Bambusa vulgaris* se destaca como matéria-prima industrial na fabricação de papel cartão por possuir fibra longa e larga. O papel cartão é utilizado na confecção de embalagens para medicamentos, alimentícios (achocolatados) e de produtos de limpeza, como as caixas de sabão em pó (Globo Rural, 1999).

### 3.4.1 Vantagens na utilização do bambu

Dentre as vantagens na utilização do bambu podem ser destacados (Beraldo & Azzini, 2004):

- Controle de erosão;
- Baixo custo;
- Uniformidade e rapidez de crescimento, ou seja, de 80 a 110 dias;
- Disponibilidade e rusticidade: não é exigente quanto à qualidade do solo;
- Grande número de gêneros e espécies;
- Facilidade de transporte fluvial, com reduzida massa específica aparente favorecida pela estrutura oca dos colmos;
- Aproveitamento total, ou seja, resíduo zero;

- Resistência mecânica boa comparada aos materiais usados em construção;
- Resistência à compressão, de aproximadamente, 50 a 90 MPa;
- Resistência à tração de, aproximadamente, 2,5 a 3,5 vezes da resistência à compressão;
- Resistência à flexão de 70 a 150 MPa;
- Facilidade de corte, uma vez que se utilizam ferramentas simples;
- Alta resistência específica; e
- Possibilidade de combinação com outros materiais.

### **3.4.2 Desvantagens na utilização do bambu**

Os principais inconvenientes do bambu (Beraldo & Azzini, 2004) são:

- Baixa durabilidade natural, porque é altamente susceptível a ataques de microorganismos e do carucho;
- Combustibilidade mais rápida em comparação com as florestas;
- Dificuldade de secagem em relação às madeiras;
- Instabilidade dimensional, variações dimensionais em presença de umidade;
- Dificuldade de realizar ligações;
- Baixa aderência com aglomerantes;
- Incompatibilidade química com aglomerantes inorgânicos, na área civil;
- Baixo módulo de elasticidade (MOE);
- Geometria irregular, porque tem forma tronco-cônica e paredes de espessura variável; e
- Variabilidade de comportamento físico-mecânico, devido à heterogeneidade dos colmos.

### **3.5 Estudos de produção de carvão vegetal de bambu**

Conforme estudos realizados por Brito et al. (1987), o bambu tem possibilidades de se tornar uma opção alternativa na produção de carvão vegetal, por possuir semelhanças com as madeiras utilizadas na produção de carvões.

Iniciaram-se estudos tecnológicos para a produção de carvão vegetal a partir de cinco espécies de bambu utilizando como matéria-prima de referência à madeira *Eucalyptus urophylla*.

Os resultados principais do estudo estão apresentados na TAB.5 e TAB.6.

TABELA 5 – Rendimentos em carvão, licor pirolenhoso e gás não-condensável obtidos a partir de espécies de bambu (média de duas repetições).

<b>Material</b>	<b>Carvão (%)</b>	<b>Rendimento do licor pirolenhoso (%)</b>	<b>Gás não-condensável (%)</b>
<i>E. urophylla</i>	28,40	49,90	21,70
<i>B. vulgaris vittata</i>	32,40	33,60	34,00
<i>B. tuldoides</i>	28,50	38,70	32,80
<i>B. vulgaris</i>	29,60	33,00	37,40
<i>D. giganteus</i>	30,40	25,20	44,40
<i>G. angustifolia</i>	32,70	37,60	29,70
Média bambu	30,70	43,60	35,70

FONTE: Brito et al. (1987).

Foram avaliadas também as características físicas de densidade aparente e real, poder calorífico superior, teor de cinzas e teor do carbono fixo.

Os valores das densidades foram superiores ao do eucalipto.

O poder calorífico apresentou valores próximos ao do eucalipto. As cinzas no carvão de bambu (3,0 a 12,3%) foram elevadas em relação ao eucalipto, devido à presença da sílica.

O teor de carbono fixo (85,6%) foi inferior ao do eucalipto (90,8%), não impedindo a sua aplicação como carvão vegetal.

TABELA 6 – Valores da densidade e poder calorífico do carvão de espécies de bambu.

<b>Material</b>	<b>Densidade aparente<sup>1</sup> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade real<sup>1</sup> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Poder calorífico superior<sup>2</sup> (kcal/kg)</b>
<i>E. urophylla</i>	0,249	1,26	8.487
<i>B. vulgaris vittata</i>	0,486	1,48	8.460
<i>B. tuldoides</i>	0,494	1,29	7.922
<i>B. vulgaris</i>	0,418	1,01	7.785
<i>D. giganteus</i>	0,419	1,23	8.685
Média bambu	0,454	1,24	7.868

FONTE: Brito et al. (1987).

<sup>1</sup> Média de 5 repetições

<sup>2</sup> Média de 3 repetições

### 3.6 Análise energética brasileira

No início da década de 80 acentuou-se o interesse das indústrias por novas tecnologias para fins energéticos, em consequência da elevação dos preços internos do óleo combustível e do gás natural, favorecendo um maior uso da lenha e do carvão vegetal. Neste cenário, descobriu-se na biomassa um grande potencial energético para movimentar a indústria, o transporte, o comércio e demais setores econômicos do País, no consumo final do Balanço Energético Nacional.

A soma do consumo final de energia, das perdas por distribuição e armazenagem e das perdas nos processos de transformação, recebe a denominação de Oferta Interna de Energia – OIE, também denominada de matriz energética ou de demanda total de energia. No Brasil, cerca de 41% da OIE tem origem em fontes renováveis, sendo 14% em geração hidráulica e 27% em biomassa. Os restantes 59% da OIE são em fontes fósseis e outras não renováveis (FIG.4).

A OIE, em 2002, foi de 198 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep)<sup>3</sup>, sendo que foram consumidos 37% no setor industrial, 27% no setor de transporte, 12% no setor residencial, totalizando 76% no consumo final, representando 177,4 milhões de tep.



FIGURA 4 Oferta Interna de Energia do período de 1970 a 2002 (Balanço Energético Nacional, 2003).

<sup>3</sup> tep: tonelada equivalente de petróleo, sendo equivalente a 10.000 kcal/kg.

Os principais consumidores de biomassa no País são os setores industriais (61%) e o residencial (18,6%), seguidos do setor de transporte (3,3%), correspondente ao álcool combustível. O uso do carvão vegetal foi significativo, na primeira metade da década de 80, quando substituiu o óleo combustível e o bagaço de cana em algumas atividades produtivas. No entanto, o consumo de biomassa no setor residencial e agropecuário foram menores em razão do pouco uso da lenha (FIG.5).

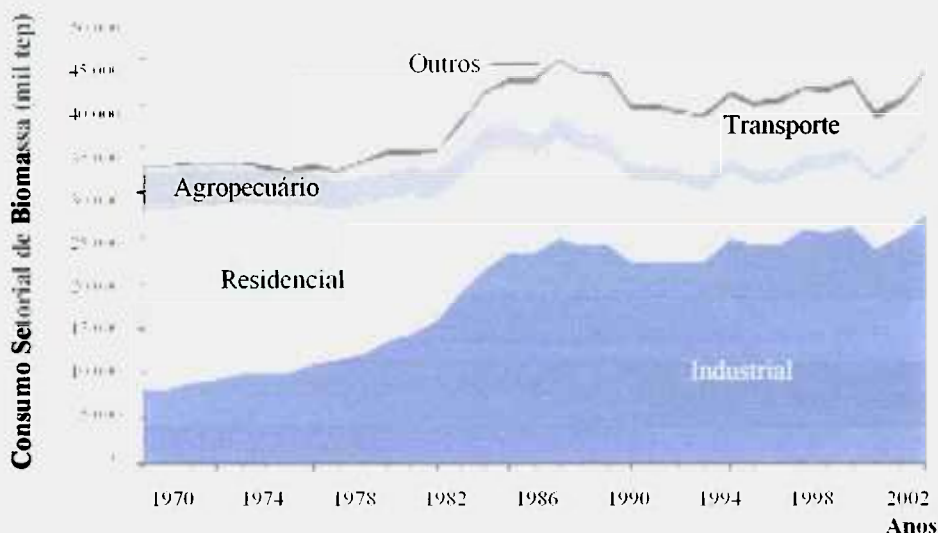


FIGURA 5 – Consumo setorial de biomassa do período de 1970 a 2002 (BEN, 2003).

### 3.6.1 Cadeia produtiva de carvão vegetal no Brasil

Conforme diagnóstico realizado em 2000 sobre a Cadeia Produtiva de Carvão Vegetal e Lenha do Estado de São Paulo foram contabilizados 1831 cadastros de empresas na cadeia, composta de 781 empresas vinculadas ao carvão vegetal, divididas em 537 de produtores e 244 distribuidores (Brito, 2000).

A categorização das empresas na cadeia produtiva de carvão vegetal é classificada como:

- Produtor de carvão vegetal: participante da cadeia que comercializa o carvão vegetal produzido por sua própria empresa;
- Distribuidor de carvão vegetal: participante da cadeia que se ocupa unicamente da comercialização do carvão vegetal de terceiros, não mantendo nenhuma atividade vinculada à sua produção;
- Distribuidor de lenha: participante da cadeia que, possuindo ou não área florestal própria, tem sua atividade vinculada à comercialização de lenha.

Os produtores de carvão estão fortemente concentrados na zona rural e os distribuidores na zona urbana. Os distribuidores são os responsáveis pelo atendimento aos comerciantes varejistas.

O preço médio corrente do carvão vegetal estipulado para o mercado em 2002 foi calculado com base nas cotações de vários Estados, sendo em média US\$ 14,3/m<sup>3</sup>.

### 3.6.2 Consumo de carvão vegetal no Brasil

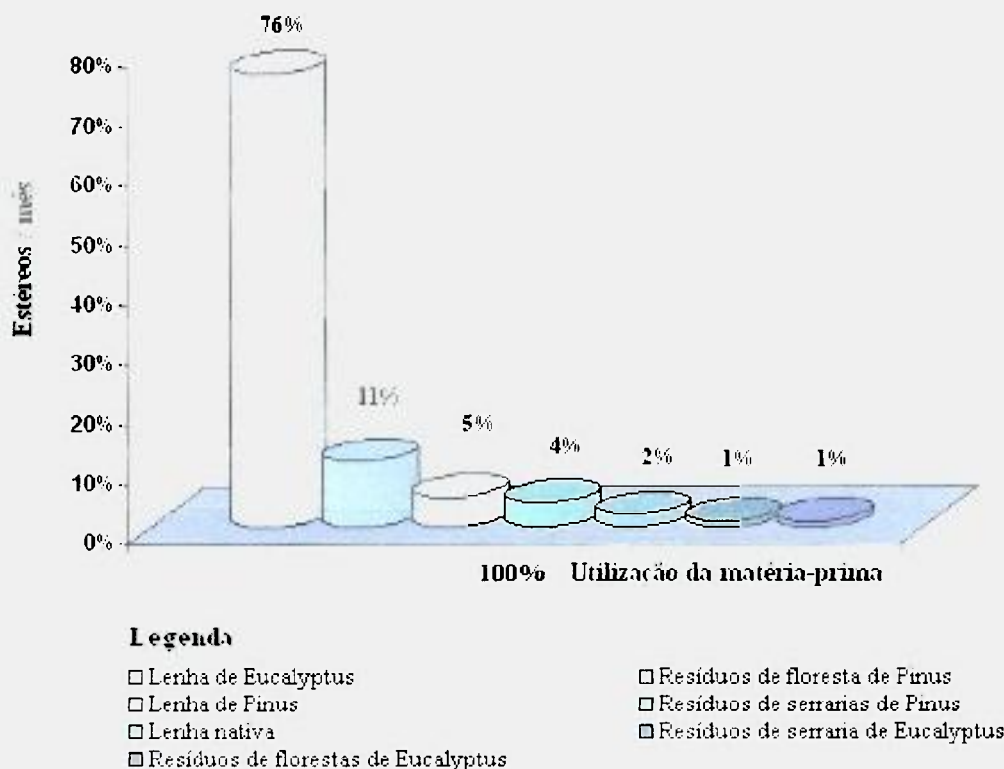
Os dados utilizados neste estudo, quanto ao consumo de carvão vegetal, preços e representatividade no mercado de carvão vegetal, foram consultados do documento do Balanço Energético Nacional – BEN, ano base de 2002. O tratamento dos dados, os critérios, as estimativas de produção, transformação e consumo de lenha e carvão para formar o consolidado do BEN, seguem a norma técnica de Avaliação do consumo residencial de lenha e carvão vegetal – NT COBEN 07/1988, além das pesquisas efetuadas nos principais setores consumidores.

Conforme os dados apresentados no consolidado de 2002 a lenha ainda é a principal fonte de energia primária como matéria-prima, a ser consumida e transformada em carvão vegetal nas carvoarias, onde é convertida em fontes de energia secundária. A outra parcela da fonte de energia primária é consumida na cocção de alimentos, consumo de carvão a vapor em fornos e caldeiras na indústria.

Para atender à demanda de madeira foram necessários desenvolver Programas de Reflorestamento com espécies de rápido crescimento vegetativo, sendo o mais conhecido e utilizado o gênero *Eucalyptus* e seus resíduos. Os reflorestamentos já conseguem suprir 70% do volume de carvão vegetal consumido no País.

Segundo diagnóstico realizado no Estado de São Paulo (Brito, 2000), o consumo de matéria-prima para produção de carvão vegetal entre novembro de 1999 a julho de 2000 foi predominantemente de lenha na forma de madeira roliça de floresta de eucalipto, representando 62.265 estéreos<sup>4</sup> por mês, representando 76% das matérias-primas utilizadas para a produção de carvão vegetal, seguida por resíduos da floresta de pinus, lenha de pinus, resíduos de serrarias de pinus, lenha nativa, resíduos de florestas de *Eucalyptus* e serrarias de *Eucalyptus*, conforme FIG.6.

<sup>4</sup> 1 estéreo corresponde a 1 metro cúbico aparente de madeira empilhada  
175 estéreos de madeira com 5 anos equivalem a 1 hectare de floresta de *Eucalyptus*.



*FIGURA 6 – Origem da matéria-prima usada para produção de carvão vegetal, no Estado de São Paulo, citada no Relatório Pró-Carvão (Brito, 2000).*

A participação do consumo de carvão vegetal está distribuída principalmente nos setores industrial, residencial e comercial.

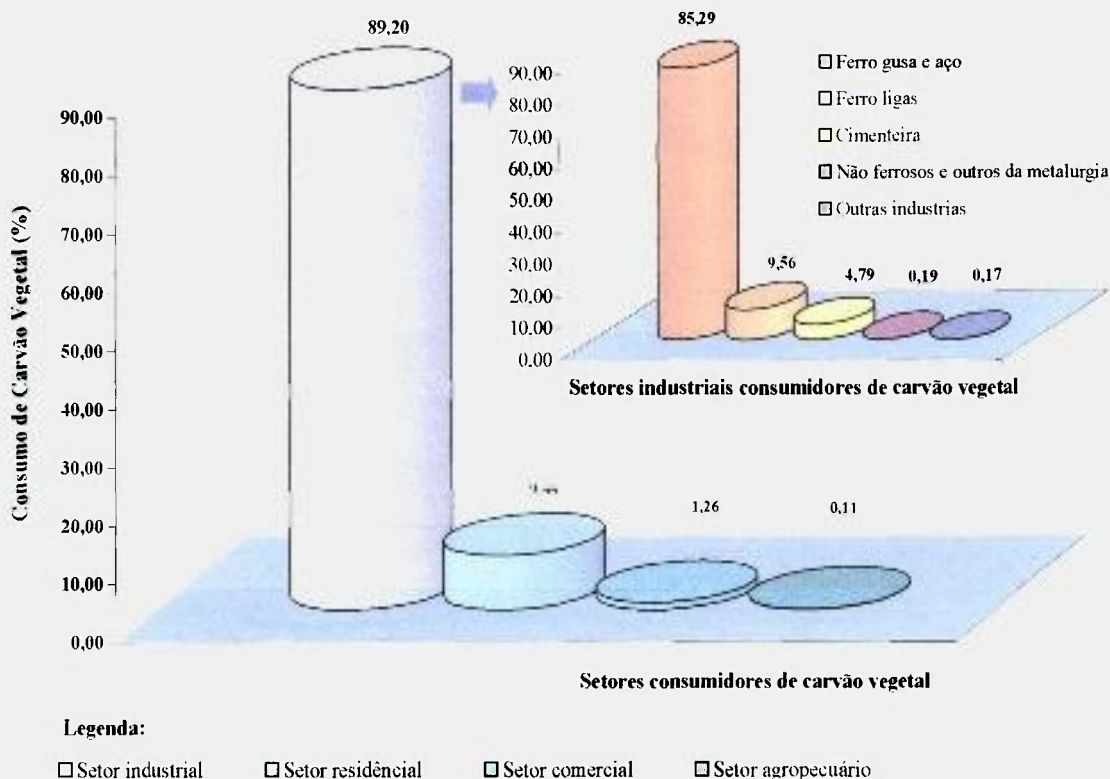
Numa escala decrescente o setor público no ano de 2003, não teve representatividade no consumo de carvão vegetal, começando a ter participação de 0,11% no agropecuário, crescendo para 1,26 % no setor comercial e passando para 9,44% no setor residencial, principalmente na cocção de alimentos, ficando a maior parcela de participação no setor industrial com 89,25%, conforme FIG. 7.

No setor industrial o consumo está distribuído nos setores:

- Produção de ferro e gusa, com participação de 85,29%;
- Ferro ligas, com participação de 9,56%;
- Cimento, com participação de 4,79%;
- Não ferrosos e outros da metalurgia com participação de 0,19%;
- outros processos com participação de 0,17% (FIG. 10).

O carvão vegetal representa 4,5% da matriz energética brasileira, sendo que o seu principal uso esta indústria siderúrgica, na produção do gusa (BEN, 2003).





*FIGURA 7 – Gráfico dos consumidores de carvão vegetal nos setores industrial, residencial, comercial e agropecuário (BEN, 2003).*

### 3.7 Considerações sobre o manuseio da madeira

No processo de produção de carvão vegetal é necessário conhecimento, técnica, experiência e atenção do carbonizador em relação aos parâmetros de controle de processo.

A qualidade do carvão vegetal depende de algumas propriedades do material e de parâmetros de carbonização como: temperatura final, tempo de aquecimento, pressão, densidade, composição química, umidade e dimensões das peças.

O processo na carvoaria inicia-se na estocagem (secagem da madeira), preparação (seleção dimensional), carregamento no forno à lenha (no caso da madeira) e manuseio da carga produzida (descarregamento).

### **3.7.1 Estoque de lenha**

As condições necessárias para a estocagem da lenha são: matéria-prima seca, caso esteja úmida a secagem poderá ser feita no pátio, por um período de, no mínimo, 60 dias e no máximo 120 dias; programação do volume de lenha a ser consumido, para evitar paralisação das atividades de produção de carvão; área plana e compacta, com cascalho, boa drenagem de água; diques de proteção ou canaletas; estar próximo de água e livre das ocorrências de enxurradas.

### **3.7.2 Preparo da lenha**

Na preparação da lenha, a escolha das dimensões das peças proporciona um melhor empacotamento dentro do forno, evitando os espaços vazios e, conseqüentemente, obtém-se um bom rendimento no forno.

O corte das peças pode ser realizado com moto-serra ou machado, em chanfros. O tamanho das peças é padronizado com gabaritos (vareta) para sua uniformização.

### **3.7.3 Carregamento da lenha**

Os carvoeiros, antes do carregamento do forno, verificam os diâmetros da madeira e os teores de umidade, uma vez que a lenha seca carboniza primeiro em relação a lenha verde, e, a lenha grossa demora mais a se carbonizar do que a lenha fina. Desta forma otimizam o início da produção de carvão vegetal.

## **3.8 Tipos de fornos de carbonização**

Os sistemas de carbonização são projetados com foco em dimensionamento, capacidade de produção dos equipamentos, materiais construtivos, pontos de controle de processos e fonte de calor necessária para o processo de degradação do material, desde a sua etapa como matéria-prima, até o produto final, como carvão vegetal.

Os tipos de fornos para produção de carvão vegetal são divididos em sistemas com fonte interna de calor ou por combustão parcial, e com fonte externa de calor.

O primeiro sistema utiliza parte da carga para a combustão, tendo uma perda de 10 a 20% do peso da carga. Trata-se de processos predominantemente artesanais. No Brasil, por razões econômicas e sociais, tem-se facilidade para construir esses fornos, de alvenaria, metal ou mistura de ambos. Os modelos mais encontrados são forno meia-laranja ou rabo-quente, de encosta ou de barranco e de meio encosta.

O segundo processo utiliza uma fonte externa de calor: o aquecimento elétrico. Mais recentemente, estão sendo utilizadas câmaras de combustão, que não necessitam de conversão de parte da carga em calor. Câmaras em fornos convencionais de tijolos possibilitam maior produtividade comparada com os fornos de alvenaria. O modelo mais utilizado é das retortas, que podem ser construídas tanto na vertical quanto na horizontal, utilizando material metálico em sua estrutura.

### 3.8.1 Forno de alvenaria

Os fornos de alvenaria são compostos por uma caixa cilíndrica formada por uma parede, conhecida como camisa, que se fecha no alto, no formato de uma cúpula. O processo de carbonização da madeira é controlado pela entrada e saída de ar nas baianas, filas e tatus. A FIG.8 ilustra os tipos de fornos utilizados, sendo eles o (a) rabo quente, (b) forno de encosta e (c) forno de meio encosta, já mencionados anteriormente.

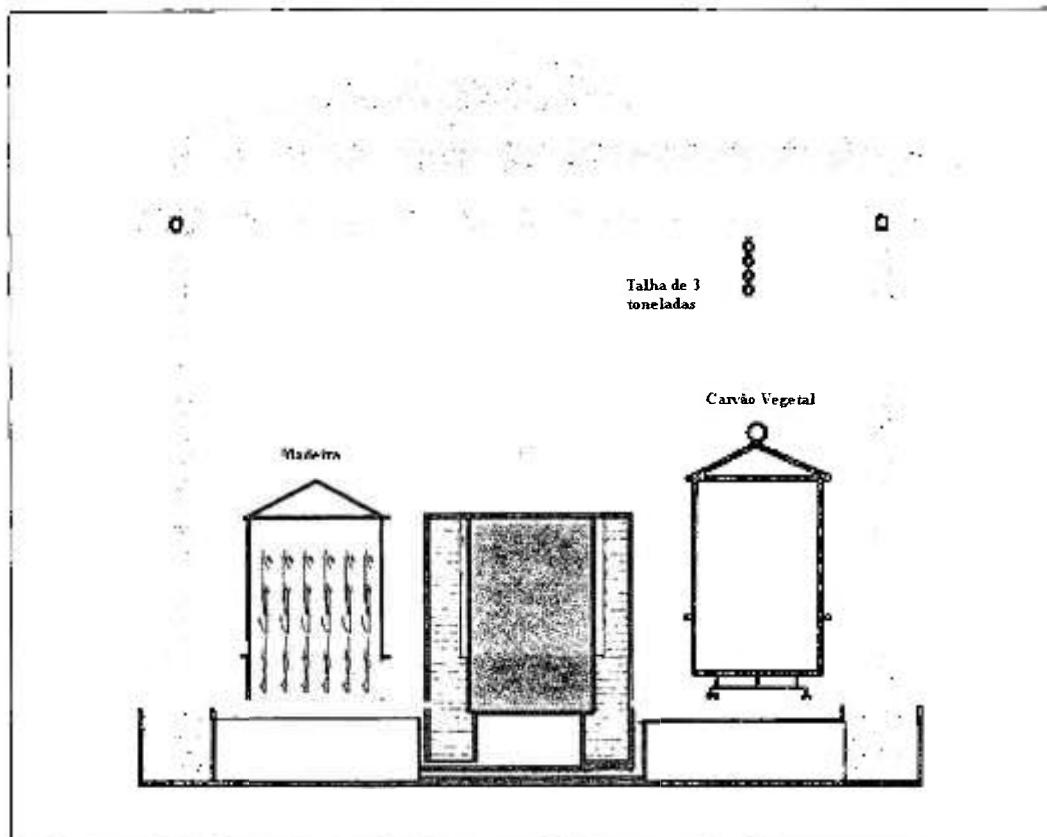


*FIGURA 8 – Tipos de fornos de alvenaria: (a) rabo quente, (b) forno de encosta e (c) forno de meio encosta (Brito, 2000).*

### 3.8.2 Forno “container”

O forno “container” consiste de um cilindro metálico, com capacidade para três estéreos de lenha, um poço de alvenaria com câmara de combustão na base e um sistema de alimentação de poluição e o tempo de “corrida” é, em média, de oito horas (FIG.9).

Podem-se destacar algumas vantagens, como, por exemplo, grandes produções num único equipamento, carga mais homogênea de carvão vegetal, possibilidade de recuperação de gases e de obtenção de subprodutos (Pimenta & Barcellos, 2000). Este forno têm características apropriadas para o processo de carbonização, pois estes materiais são ocos, devem ser serrados a mão para melhor aproveitamento do espaço interno do forno, portanto tem um maior carregamento.



*FIGURA 9* Desenho esquemático do forno “container” adaptado do vídeo como produzir carvão para churrasco, do Centro de Produções Técnicas - CPT (Oliveira, 2000).

### 3.8.3 Pontos de controle da carbonização

Para os carvoeiros, o fluxo de volume e a cor da fumaça são os pontos de controle na carbonização. A fumaça branca representa a perda de água pela secagem da madeira; após esta etapa começa o momento de controlar a entrada de oxigênio vedando-se as entradas para o início da carbonização.

Quando o forno libera fumaça branca misturada com azul, significa que a carbonização não é uniforme. Para corrigir este processo o carvoeiro abre as entradas de ar.

O processo de carbonização está completo quando a fumaça emitida possui uma zona incolor a uns 20 cm acima da chaminé. Nesta etapa, todas as entradas de ar do forno são vedadas promovendo ausência de oxigênio e finalizando o processo.

### 3.8.4 Descarregamento do forno

O descarregamento do forno é realizado após o resfriamento do carvão. Após a retirada do carvão, este é protegido da umidade com cobertura plástica ou lona e levado para o local de uso ou embalagem.

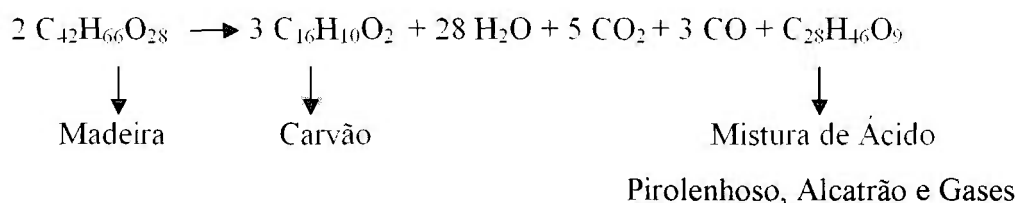
### 3.9 Processo de carbonização

O processo de produção de carvão vegetal ocorre após a pirólise (piro = fogo; lise = degradação) da madeira ou de outra biomassa vegetal, em que o principal fenômeno ocorrido é o processo de degradação do material, devido à ação do calor, em atmosfera não oxidante e temperatura controlada, promovendo a decomposição térmica, tendo como subprodutos materiais voláteis parcialmente condensáveis; esta etapa também é conhecida como “destilação seca da madeira” (Dusmeny & Noyer, 1908). Porém, quando se deseja somente obter o carvão vegetal, realiza-se o “processo de carbonização”.

Considerando o aspecto químico do processo de carbonização, pode-se observar que ocorrem diferentes fenômenos simultaneamente na degradação térmica da madeira, em diferentes regiões no interior da madeira. Os pesquisadores Beal e Eickner classificam estes fenômenos em 4 regiões distintas:

- Na faixa de temperatura até 200 °C há produção de gases não combustíveis, tais como vapores de água, CO<sub>2</sub>, ácido fórmico e acético.
- Na faixa de temperatura entre 200 °C e 280 °C são produzidos os mesmos gases da faixa de temperatura de 200 °C, porém há uma diminuição nos vapores de água e o aparecimento de CO. As reações que ocorrem nesta região de temperatura são de natureza endotérmica.
- Na faixa de temperatura de 280 °C e 500 °C ocorre a carbonização através de reações exotérmicas. Os produtos obtidos nesta etapa podem passar por reações secundárias, são combustíveis e incluem o alcatrão, CO e CH<sub>4</sub>.
- Acima de 500 °C o carvão vegetal já está formado.

Conforme estudos citados por Klar (1925), os fenômenos que ocorrem com a carbonização da madeira, a 400 °C podem ser expressos, respectivamente, pela equação genérica:



O processo de carbonização consiste, basicamente, em concentrar carbono e expulsar o oxigênio sob a forma de gases e líquido condensado, com conseqüente aumento do conteúdo energético do produto. A relação teor de carbono no carvão vegetal por teor de carbono na madeira é de aproximadamente 1.7.(Penedo, 1982).

No fluxograma de carbonização mostrado na FIG.10 estão identificadas as principais etapas do processo de carbonização, onde aparecem o produto carvão vegetal e os sub-produtos da carbonização, os quais não são objetos de estudos deste trabalho.

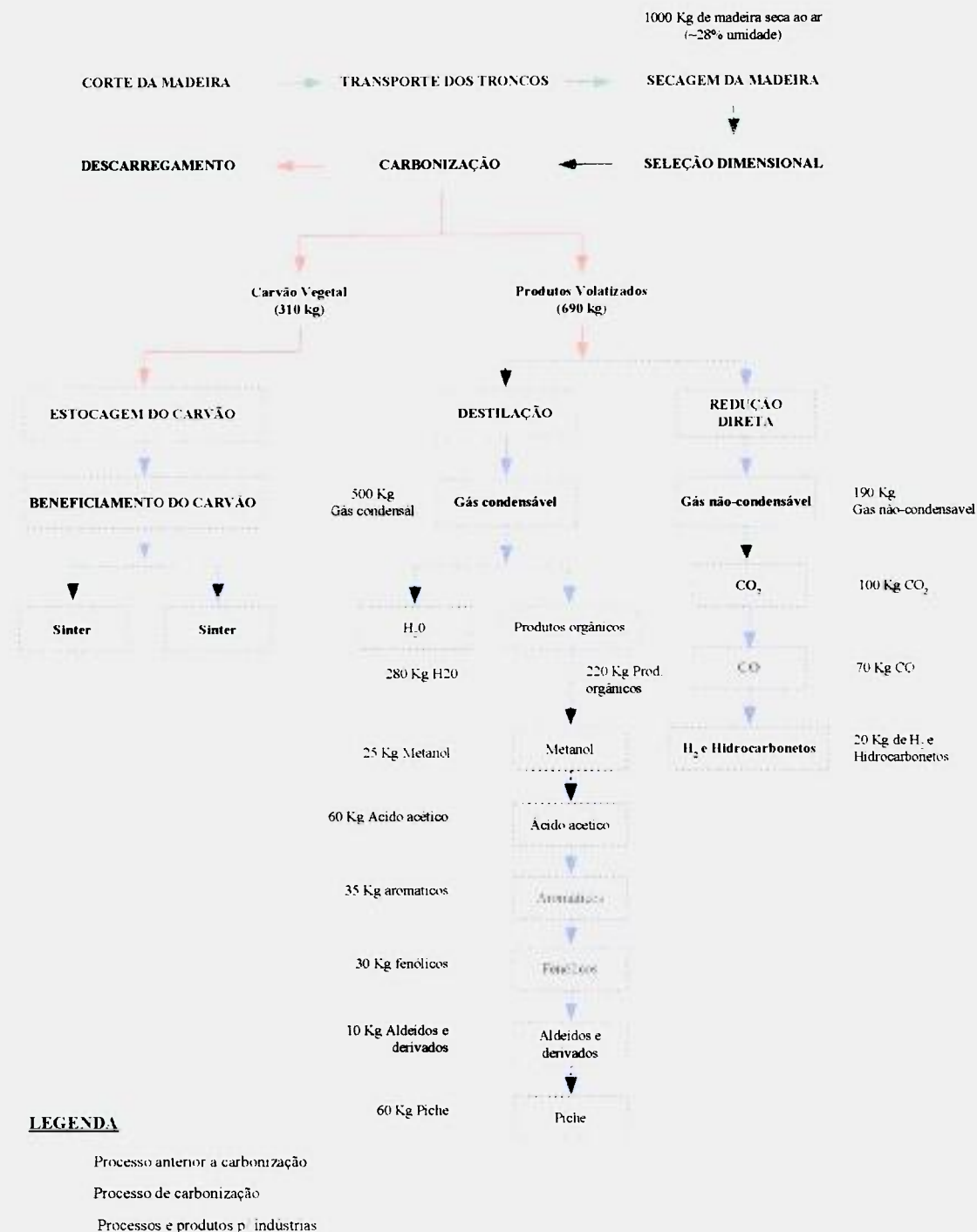


FIGURA 10 – Fluxograma das etapas do processo de carbonização da madeira adaptado do “Guide Technique de la Carbonization” (Briane & Doat, 1985).

### 3.10 Termogravimetria

O comportamento geral apresentado pela madeira no processo de carbonização para a produção de carvão vegetal está ligado aos fenômenos que ocorrem com os seus três constituintes principais: celulose, hemicelulose e lignina. Cada um desses componentes reage liberando e absorvendo energia e perdendo massa, devido à sua natureza química. Esta perda de massa ocorre quando a madeira e seus componentes são submetidos a um aquecimento contínuo e controlado, e pode ser caracterizada por análises termogravimétricas, identificando as fases do processo e reações dos constituintes, mostrando a evolução da perda de massa em função da temperatura de aquecimento (Penedo, 1982).

A caracterização termogravimétrica da madeira pode auxiliar na escolha de faixas de temperaturas utilizadas no processo de carbonização, para a obtenção do carvão vegetal, podendo ser aplicável para a caracterização de carvões comerciais, buscando a economia de energia utilizada nos fornos, além de identificar as principais fases das reações de liberação ou absorção de energia, e perda de massa, que estão diretamente ligados a qualidade do carvão vegetal.

Assim sendo, a caracterização termogravimétrica do bambu pode auxiliar na escolha de faixas de temperaturas utilizadas no processo de carbonização, para a obtenção do carvão vegetal, no forno elétrico do laboratório.

### 3.11 Carbonização da celulose

Estudos realizados por Van Krevelen, citados por Beall e Eickner (1970), obtiveram o valor de 40 kcal/mol como resultado da energia de ativação do processo de decomposição da celulose. A interpretação dos dados resultou numa classificação da degradação da celulose em estágios diferentes, como se segue:

- No patamar de 155 °C e 259 °C, correspondente ao aquecimento da celulose, não houve quebra de ligação C - H;
- As reações exotérmicas acontecem nas faixas de temperatura de 259 °C a 380 °C, 389 °C a 414 °C e 414 °C a 452 °C. Nestas faixas ocorre a quebra da molécula de celulose;
- Na faixa entre 452 °C e 500 °C há formação de substâncias estáveis;
- A reação endotérmica está entre 500 °C e 524 °C indicando o término das reações, pois é uma reação ligada a completa degradação de celulose.

### 3.12 Carbonização da hemicelulose

Estudos realizados por Browne, citados por Beall e Eickner (1970), relatam que a hemicelulose é o componente da madeira responsável pela formação da maior parcela de ácido acético, e também o componente menos estável devido a sua natureza amorfa.

A hemicelulose começa a perder peso próximo de 225 °C;

Os produtos formados a 300 °C, quando submetidos a temperaturas mais altas, se decompondo e se volatilizando sendo que a maior parte dos voláteis se formam a 500 °C que é o líquido condensado.

### 3.13 Carbonização da lignina

Os estudos relativos à pirólise da lignina são relativamente escassos devido, principalmente, à dificuldade de se isolar este componenete. Os mecanismos de decomposição da lignina não estão bem determinados, devido à sua estrutura relativamente complexa, ocasionando rupturas e formação de inúmeros compostos.

Estudos realizados por Van Krevelen, citados por Beall e Eickner (1970), obtiveram o valor de 28 kcal/mol como resultado da energia de ativação do processo de decomposição da lignina. A interpretação dos dados resultou numa classificação da degradação da lignina em estágios diferentes, como se segue:

- A lignina começa a se degradar a partir de 150 °C e continua a perder peso acima de 500 °C, resultando em cinza.
- A lignina é o composto mais importante para a análise de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo de carbonização esta diretamente relacionado com o conteúdo de lignina na madeira.

### 3.14 Características de qualidade num carvão vegetal de madeira

Os estudos de carvão vegetal produzido no Brasil apresentam variação em suas propriedades em função do tipo de madeira e dos parâmetros do processo de carbonização. Dentre esses, são destacados: a temperatura final de carbonização, taxa de aquecimento e pressão, uma vez que estes atuam não só no rendimento do processo, como também nas propriedades químicas e físicas do carvão obtido.

Alguns resultados de ensaio de destilação em retorta elétrica, para a espécie *Eucalyptus Grandis*, com idade de 5,5 anos, apresentaram diferenças nos rendimentos dos produtos da carbonização, conforme TAB.7.



TABELA 7 – Rendimento dos produtos obtidos na carbonização de madeira.

Material	Temp. de Tratamento °C	Rendimento (%)			Rendimento (%)		
		base úmida			base seca		
		Carvão	Líquido	Gás <sup>5</sup>	Carvão	Líquido	Gás
<i>Eucalyptus</i>	450	28,20	51,70	20,10	32,89	43,68	23,43
<i>Grandis</i>	550	24,20	54,20	21,60	28,15	46,73	25,12
	700	23,00	55,20	21,80	27,57	46,30	26,13

FONTE: CETEC (1982).

Foi observado que a elevação da temperatura de carbonização resulta em um aumento nos rendimentos de líquido e gás, com conseqüente diminuição no do carvão. Com o aumento da temperatura os gases voláteis tendem a migrar para a superfície, enriquecendo a fase líquida e gasosa.

Conforme Mello (2001), as propriedades médias das características do carvão vegetal comercializado no Brasil para processos siderúrgicos (auto-forno), carvão vegetal para churrasco e briquetes de carvão vegetal, estão apresentados na TAB.8.

TABELA 8 – Propriedades médias das características do carvão vegetal de madeira.

Item	Carvão vegetal	Carvão vegetal	Carvão vegetal
	Alto-forno	Churrasco	Briquetes
Carbono fixo	65-75%	superior 78%	superior 65%
Materiais voláteis	25-35%	máx. 16%	máx. 20%
Cinza	2-5%	máx. 6%	máx. 15%
Granulometria	9-100 mm	< 10 mm (máx.6%)	< 20 mm
		< 20 mm (máx.30%)	(máx.10%)
		< 80 mm (64%)	

FONTE: Mello (2001).

<sup>5</sup> Obtido por diferença

Conforme a temperatura aumenta as reações no processo de carbonização provocam mudanças substanciais na composição do carvão (TAB.9).

TABELA 9 – Análise imediata do carvão vegetal e rendimento em carbono fixo.

Análise imediata	Temperatura de carbonização do <i>E. Grandis</i>		
	450 (°C)	550 (°C)	700 (°C)
Umidade do carvão	4,17	2,97	2,41
Base seca (%)			
Carbono fixo	75,06	86,53	89,82
Materiais voláteis	21,03	10,12	7,25
Cinzas	3,91	7,25	2,93
Rendimento	32,89	28,15	27,57
Base úmida (%)			
Carbono fixo	71,93	83,96	87,66
Materiais voláteis	20,15	9,82	7,07
Cinzas	3,75	3,25	2,86
Rendimento	28,20	24,20	23,00
Rendimento - carbono fixo <sup>6</sup> (%)	23,66	23,63	24,17

FONTE: CETEC (1982).

<sup>6</sup> Calculado por: rendimento em carvão (base seca) X (% carbono fixo (base úmida) / 100)

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Seleção de espécies

Para este estudo as amostras de *Bambusa vulgaris* Schard., com idade de dois anos, foram coletadas no viveiro do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), na Fazenda Santa Elisa, localizada em Campinas (FIG.11). As amostras foram coletas sob orientações e instruções do Departamento de Fibras do IAC, para que a amostra coletada fosse a mais homogênea possível.



FIGURA 11 – Touceira de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad. do viveiro do IAC (Campinas, 2001).

### 4.2 Identificação da espécie

Geralmente, a identificação de uma planta começa pela sua estrutura reprodutiva concentrada na flor. No entanto, os bambus têm discreta ou rara floração em muitas espécies. A identificação também esta baseadas em caracteres vegetativos morfo-anatômicos, climatológicos e geográficos. A forma como foi desenvolvida a identificação neste trabalho esta descrita no item 4.3.

### 4.3 Coleta de material

As amostras foram coletadas de três touceiras de *B. vulgaris*, na Fazenda Santa Elisa (FIG. 12), no mês de junho de 2003, utilizando-se facão e machado para o corte dos colmos de maior porte.

A condição climatológica na data da coleta foi 0,0 mm de chuva, à temperatura de 30 °C.

As informações morfológicas do solo do local são latossolo vermelho eutroférico típico, próximo ao tributário do Córrego da Lagoa, com pH moderadamente ácido entre 5 e 4; a drenagem do solo é boa e a sua textura é argilosa (Oliveira et al 2003).

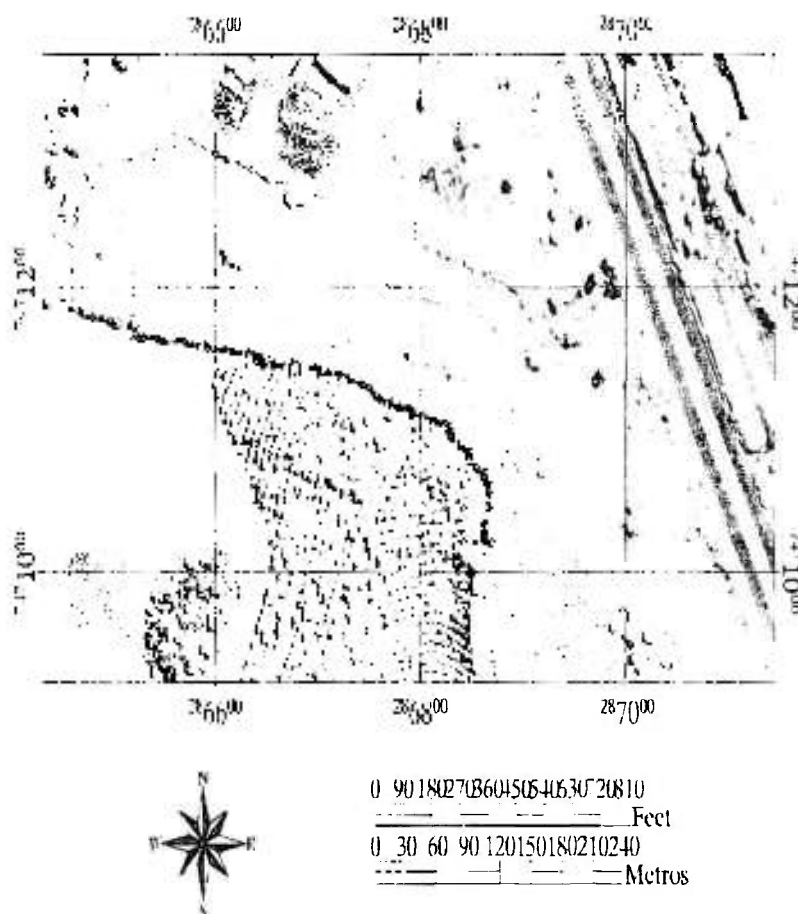
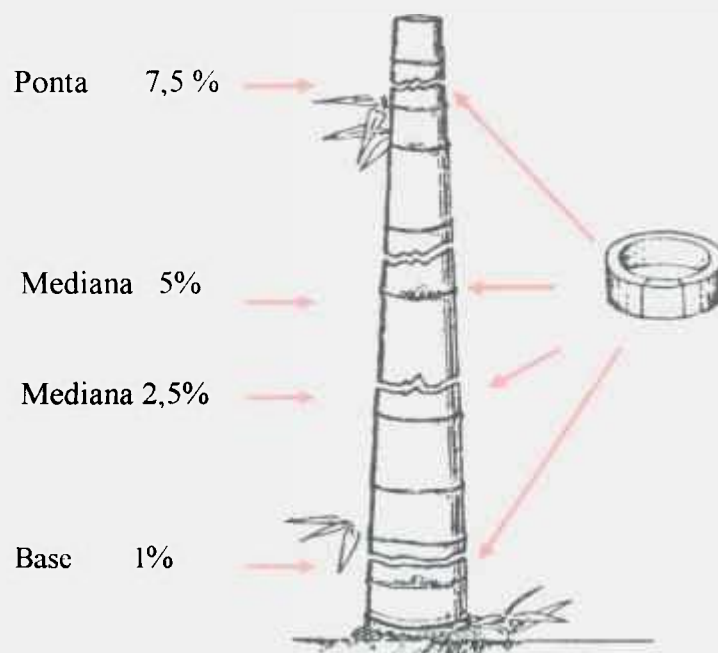


FIGURA 12 - Imagem de satélite "Quick Bird" obtida em abril de 2002, do local de coleta da *B. vulgaris* (Campinas, 2003).

As principais características dos colmos da espécie estudada são a cor verde, altura aproximada de 15 m metros e diâmetros que variam do chão ao topo de 5 a 10 cm.

#### 4.4 Corte, moagem e transporte

Os colmos foram amarrados com barbante e cortados rente ao solo, logo acima do nó, com foice, sem deixar o bambu rachar ou lascar, em três segmentos, nas posições basal, mediana e topo, no sentido longitudinal, a partir da base, sendo o primeiro corte a 10 cm do solo representando 1% e os subsequentes a 25 cm (2,5%), 50 cm (5%), 75 cm (7,5%) do solo (FIG.13).



*FIGURA 13 -- Desenho adaptado do corte dos segmentos de colmos de B. vulgaris, pertencente ao viveiro do IAC (Campinas, 2001).*

Após o corte no campo, os internódios dos colmos foram separados com o auxílio de serra circular de vídea de 60 dentes e 12”, no Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola (UNICAMP). Dos colmos foram obtidos os cavacos com comprimentos de 1,5 cm, 3,0 cm e 6,0 cm, largura de 0,4 cm, 0,8 cm e 1,2 cm e espessura de 0,2 cm, 0,6 cm e 1,0 cm, utilizando como ferramenta, o “rachados de bambu” (FIG.14a). Os cavacos foram reunidos em uma bandeja plástico e separados em quatro partes (FIG.14b e FIG.14c). Antes tirou-se amostras de um terço do material para os experimentos de densidade aparente relativa.

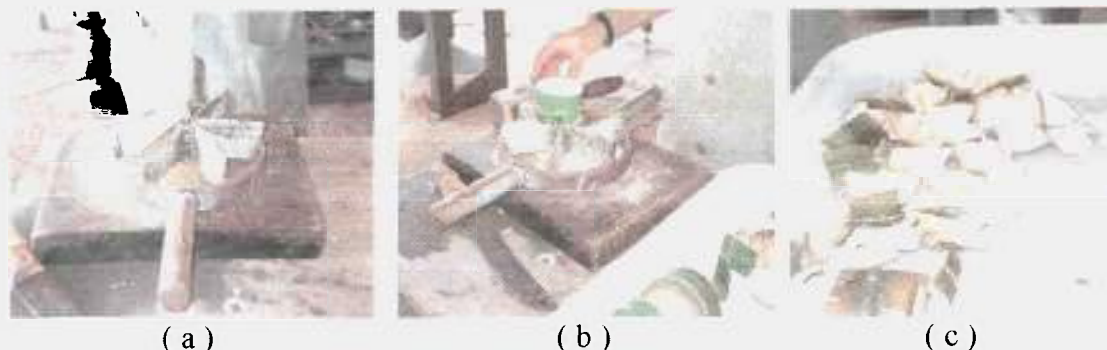


FIGURA 14 – (a) ferramenta de corte; (b) processo de corte e (c) cavacos dos colmos de *B. vulgaris* (UNICAMP, 2003)

Os cavacos restantes foram transformados em serragem utilizando-se o desfragmentador DP-1 da marca Nogueira. As amostras de serragem da *B. vulgaris* compostas de colmos, nós e internós foram acondicionadas em sacos plásticos, dentro de uma caixa de isopor com gelo seco, para o transporte do IAC a São Paulo. A seguir, as mesmas foram colocadas em freezer a 4 °C, para a manutenção das condições de coleta para a última etapa de moagem em moinho tipo “Willye”, obtendo-se serragens com granulometria de 40 *mesh* retidas na peneira para a realização das análises química, rendimento e termogravimétrica, e serragens com granulometria de 10 *mesh* retidas na peneira para a determinação da análise imediata<sup>7</sup> e poder calorífico superior.

As amostras de madeira escolhidas como padrão de referência foram da espécie *Eucalyptus saligna*, e cedidas pelo Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, para ser transformada em cavacos e serragens com granulometria igual às amostras de *B. vulgaris* para as mesmas análises realizadas com o bambu.

#### 4.5 Produção de carvão vegetal – carbonização

O *B. vulgaris* possui semelhanças com a espécie arbórea-madeira, pela natureza lignocelulósica, sendo possível aplicar o processo convencional de carbonização de madeira.

As amostras foram descongeladas e moídas em moinho tipo “Willye”, obtendo-se serragens com granulometria de 10 *mesh* retidas na peneira para a determinação da análise imediata e poder calorífico superior preparadas e colocadas em cadinhos de porcelana fechados com tampa, em forno elétrico, com monitoração da temperatura por meio de termopares. O aquecimento ocorreu por 1 hora até o forno atingir a temperatura de tratamento de 400 °C, 600 °C e 800 °C.

<sup>7</sup> Análise imediata determina os teores de umidade, cinza, materiais voláteis e carbono fixo do carvão.



## 4.6 Caracterização da matéria-prima

### 4.6.1 Determinação da degradação térmica

A análise térmica abrange um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física de uma substância e/ou seus produtos de reação é medida em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a um programa controlado de temperatura (Ionashiro & Giolito, 1988).

Foram realizadas análises qualitativas termogravimétricas, determinando-se a degradação térmica de amostras do *B. vulgaris* e *E. saligna*, identificando-se as fases de liberação de pequenas quantidades de vapor d'água, gases voláteis, carbono fixo e de cinza, a temperaturas de 400 °C e 600 °C, obtendo-se as curvas TG-DTG, como ensaio preliminar de identificação do comportamento físico.

As amostras de *B. vulgaris* e *E. saligna* foram submetidas aos ensaios de termogravimetria/termogravimetria derivada (TG/DTG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC). As curvas TG/DTG e DSC foram obtidas, respectivamente, por meio da termobalança TGA-50 e célula DSC-50, ambas da marca Shimadzu, à 10 °C/min.

Para os ensaios de TG/DTG, realizados entre 25 °C e 900 °C sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> e de ar (50 mL/min), utilizou-se cadinho de Pt contendo, aproximadamente, 6 mg de amostra à 40 *mesh*.

Nos experimentos de DSC, realizados entre 25 °C e 500 °C e sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> (100 mL/min), empregou-se cadinho de Al contendo, aproximadamente, 2 mg de amostra à 40 *mesh*.

### 4.6.2 Determinação da análise imediata

A determinação da análise imediata da serragem do *B. vulgaris* e do carvão vegetal do *B. vulgaris* e do *E. saligna* foi realizada conforme a norma NBR 8112/86. A análise da serragem foi realizada no Laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, para a amostra de bambu com idade de dois anos. A análise do carvão vegetal foi realizada no Laboratório de Ciências Florestais – ESALQ/USP, para o bambu com idade de dois anos e da madeira com idade de cinco anos.

A análise imediata é composta pela determinação do teor de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo.

As amostras foram preparadas conforme a norma NBR 6923 e foram utilizadas peneiras para os ensaios conforme a norma NBR 5734. A fração quarteada da amostra foi moída, separando-se a fração abaixo de 20 malhas e retida em 100 malhas.

As amostras com 1g foram pesadas, em balança analítica e colocadas em estufa, estabilizada em 105 °C, por duas horas e posteriormente, colocadas em dessecador por 1 hora e depois pesadas.

Os equipamentos e aparelhagens utilizados para a realização da análise imediata foram: 01 moinho tipo “Willye”; 01 forno de carbonização elétrico, 01 estufa com controle automático de temperatura; 10 cadinhos de porcelana, CHIAROTTI A-37 de 5 ml; 01 dessecador; 01 mufla com controle de temperatura da marca PYROTEC; 01 balança analítica com precisão de 0,001g e peneira de 20 e 100 malhas U.S. Tyler.

#### **4.6.2.1 Teor de umidade**

As amostras foram pesadas, com aproximadamente 1g, com granulometria inferior a 19 mm.

Os teores de umidade do bambu e da madeira foram calculados, de acordo com a equação: % umidade = ((massa inicial da amostra – massa final da amostra seca em estufa)) \* 100.

As análises foram obtidas em duplicata.

#### **4.6.2.2 Teor de cinzas**

As amostras foram pesadas, com aproximadamente 1g, com granulometria inferior a 0,210 mm.

Os teores de cinzas do bambu e da madeira foram calculados, de acordo com a equação: % cinzas = (massa do resíduo após calcinação / massa da amostra após secagem em estufa) \* 100.

As análises foram obtidas em duplicata.

#### **4.6.2.3 Teor de materiais voláteis**

As amostras foram pesadas, com aproximadamente 1g, com granulometria inferior a 0,210 mm e superior a 0,150 mm.

Os teores de materiais voláteis do bambu e da madeira foram calculados, de acordo com a equação: % materiais voláteis = (massa da amostra após secagem em estufa – massa da amostra após secagem a 950 °C / massa da amostra após secagem em estufa) \* 100.

As análises foram obtidas em duplicata.



#### 4.6.2.4 Teor de carbono fixo

As amostras foram pesadas, com aproximadamente 1g, com granulometria inferior a 0,210 mm e superior a 0,150 mm.

Os teores de carbono fixo do bambu e da madeira foram calculados, por diferença, de acordo com a equação: % carbono fixo = 100 - (teor de matérias voláteis + teor de cinzas).

As análises foram obtidas em duplicata.

#### 4.6.3 Determinação da análise química – extrativos totais, lignina e holocelulose

A análise química para determinação do teor de extrativos totais e lignina da serragem da *B. vulgaris*. e do *E. saligna* foi realizada conforme as normas da “*Technical Association of the Pulp and Paper Industry*” – TAPPI T 222 om-22 e T 264 cm-97, no Laboratório de Ciências Florestais – ESALQ/USP, para a amostra de bambu com idade de dois anos e da madeira com idade de cinco anos.

Para a realização da análise química, utilizou-se a serragem obtida em moinho semi-industrial após a passagem em peneiras com retenção de 40 *mesh*, sendo pesado 1 g em balança analítica e colocada em saquinhos fechados manualmente e grampeados. Os saquinhos foram colocados em Becker com solução de água destilada de 100 ml em banho maria por 3 horas com agitação de 15 minutos. Após este período, iniciou-se a filtragem com álcool e álcool tolueno, passando 250 ml de água quente. As amostras, dentro dos saquinhos, foram secas em estufa a  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$  até a estabilidade do peso, por 24 horas. As amostras foram pesadas em balança analítica e retiradas 3 g secas e transferidas para um erlemeyer de 125 ml, adicionando 3 ml de ácido sulfúrico a 72% e 85 ml de água destilada, agitando manualmente com bastão por 1 hora. As amostras foram então levadas a uma autoclave vertical e aquecidas a  $115^{\circ}\text{C}$  por 1 hora.

Os principais equipamentos utilizados para a determinação da densidade básica foram: 01 manta elétrica da marca FOMEME modelo 17.0/1; 01 balão de 1 litro/ boca esmerilada 20 X 40 mm; 01 extractor de 500ml; 01 condensador de 30 cm; 01 estufa de secagem e esterilização, marca FANEM, modelo 315 SE; 01 balança analítica com precisão de 0,001g; e 01 autoclave vertical CS, marca PRISMATEC, 18 litros.

#### 4.6.4 Determinação do rendimento

A determinação do rendimento do carvão vegetal do *B. vulgaris* e do *E. saligna* foi realizada conforme a norma NBR 8112/86, no Laboratório de Ciências Florestais – ESALQ/USP.

A equação utilizada no cálculo do rendimento do carvão foi: % Rendimento = (peso das cinzas / peso seco) \* 100.

#### 4.6.5 Determinação do poder calorífico superior

A determinação do poder calorífico da matéria-prima do *B. vulgaris* foram realizadas conforme a norma *Standard Test Methods for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter* – ASTM D 240 - 02, no Laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, para a amostra de serragem do bambu com idade de dois anos, nas regiões da base, mediana e ponta.

A determinação do poder calorífico do carvão vegetal do *B. vulgaris* e do *E. saligna* foram realizadas conforme a norma NBR 8633/84, no Laboratório de Ciências Florestais – ESALQ/USP.

As amostras foram preparadas conforme a norma NBR 6923 e foram utilizadas peneiras para os ensaios conforme a norma NBR 5734, ou seja, utilizou-se a fração inferior da peneira ABNT n. 70.

Os equipamentos e aparelhagens utilizados para a realização da análise imediata foram: 01 bomba calorimétrica; 01 balança com sensibilidade de 0,1 mg; 01 agitador mecânico; 01 circuito de ignição; 01 cronômetro; 01 termômetro com sensibilidade de 0,002 °C; cadelhos de quartzo e 01 fio-fusível de níquel-cromo.

As amostras foram secas e prensadas em forma de pastilha, junto com um fio-fusível de massa conhecida. A massa das amostras foi da ordem de 1,0 g para que a diferença de temperatura total ficasse em torno de 3 °C, ou seja, sua combustão desprendesse de 25 kJ a 29 kJ. O objetivo do uso do fio-fusível em forma de espiral foi o de garantir o contato da amostra com os dois terminais da bomba calorimétrica.

Na preparação da bomba calorimétrica colocou-se 5 ml de água destilada e lentamente introduziu-se oxigênio a uma pressão de 3,0 Mpa; adicionou-se a mesma quantidade de água no vaso calorimétrico, que fica na parte interna da bomba; e simultaneamente iniciou-se o controle da temperatura dentro da camisa isolante observando o termômetro até atingir 1,5 °C abaixo da temperatura ambiente, quando colocou-se o vaso na camisa isolante e a bomba no vaso para o início do ensaio.

O poder calorífico do carvão de bambu e do carvão da madeira foram calculados, de acordo com a equação: poder calorífico =  $((2.327,6 * \Delta T) - 10) / \text{peso seco}$

As análises foram obtidas em duplicata, devendo ser apresentado com uma precisão de  $\pm 20 \text{ J/g}$ .

#### 4.7 Análise estatística dos dados

O papel da estatística inferencial, também conhecida como estatística *bayesiana*, na investigação científica de amostras de natureza florestal é de suma importância, pois os métodos estatísticos permitem determinar a margem de erro associada às conclusões, com base na variabilidade observada nos dados, uma vez que, as condições de interação do meio-ambiente com o desenvolvimento das espécies são muito particulares e variáveis. Portanto, neste trabalho os resultados serão analisados por meio da estatística bayesiana.

A principal estratégia na análise de dados do processo de pesquisa exploratória está na administração da pesquisa, onde os dados são compilados e organizados, utilizando-se diversas técnicas da estatística descritiva, como por exemplo, gráficos de barras que auxiliam na visualização das variáveis e na interpretação dos resultados de investigação.

Na maioria das vezes, os dados provêm de amostras que representam uma parte da população, com probabilidade de erro. Para trabalhar-se o risco do erro utiliza-se a estatística *bayesiana* para a tomada de decisões, usando os testes clássicos de significância e a lógica das hipóteses (Cooper, 2003).

Para a análise estatística utilizou-se a análise de variância - ANOVA. Esta ferramenta decompõe em vários componentes identificáveis, a variação total entre os valores obtidos no experimento. Cada componente atribui a variação a uma causa ou fonte de variação diferente; o número das causas de variação ou “fatores” depende do delineamento da investigação (Callegari- Jaques, 2004).

O material estudado foi agrupado por espécies utilizando-se o modelo ANOVA para o delineamento experimental casualizado, com no mínimo duas repetições e 3 tratamentos de temperaturas.

Para as espécies analisadas adotou-se um nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , com intervalo de confiança de 95% (Batista, 1997).

O “software” estatístico utilizado para a análise de variância foi o “Excel” 2000 (Lapponi, 2000).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise termogravimétrica

#### 5.1.1 Análise termogravimétrica TG e DTG

As curvas características das análises termogravimétricas TG e DTG da serragem de *B. vulgaris* representaram a perda de massa de 7,2% (sob atmosfera de N<sub>2</sub>), conforme mostra a figura 15 e 9,6% (sob atmosfera de ar), devido à liberação da água de umidade, em função da elevação da temperatura entre 25 °C e 120 °C, aproximadamente (FIG.16).

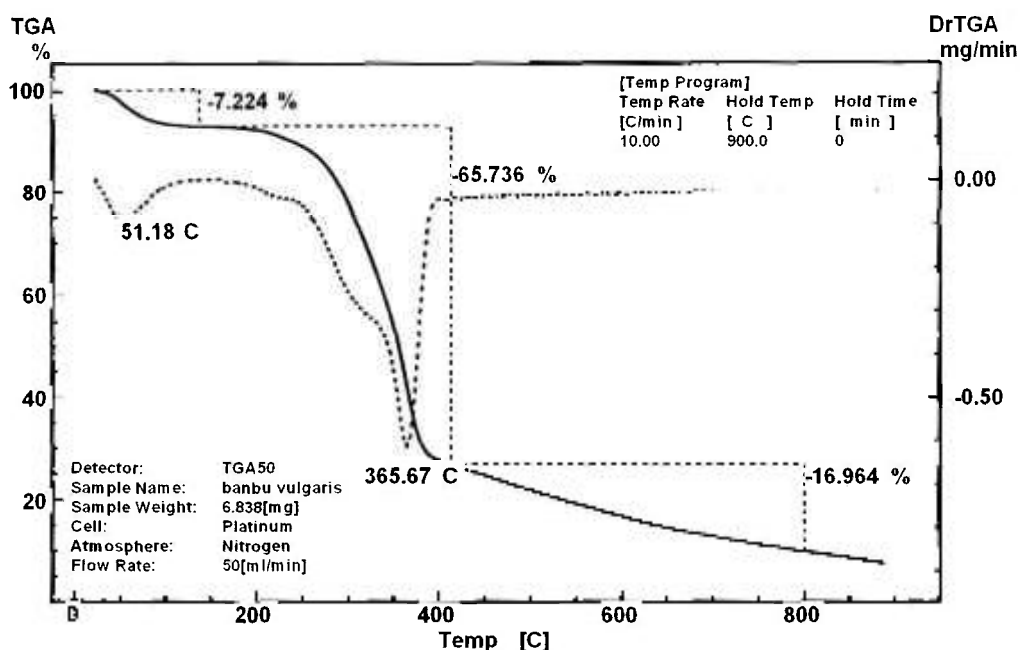
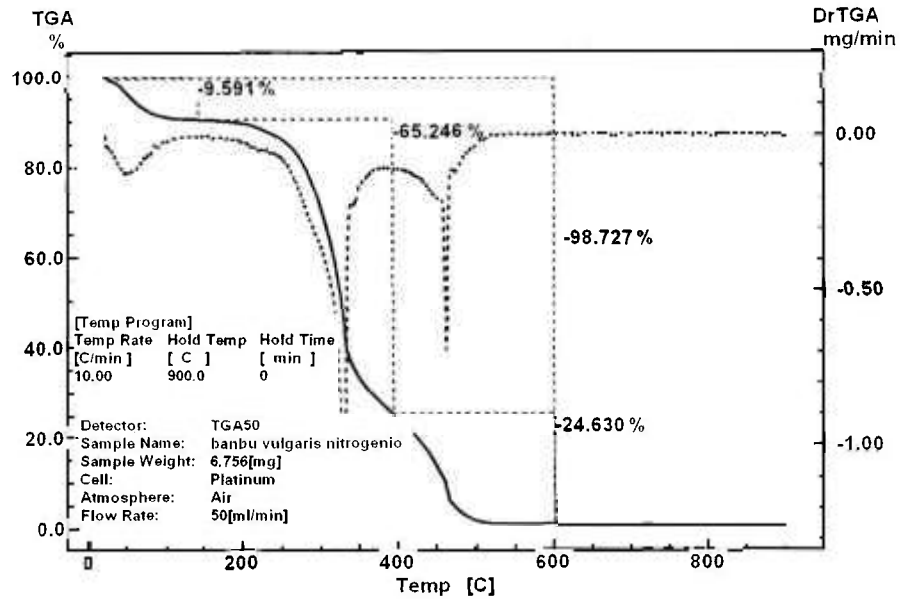


FIGURA 15 – Curva TG/DTG, aquecimento de 10 °C/min sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> sintético (50 mL/min), da serragem do *B. vulgaris* (LATIG, 2003).

Na faixa de temperatura entre 120 °C e 400 °C ocorreu perda de massa mais significativa na amostra, de aproximadamente 65%, correspondente à etapa de decomposição térmica do bambu, iniciando-se a fase de formação de carbono elementar.

Entre 400 °C e 550 °C, sob atmosfera de ar, observou-se uma rápida perda de massa de 24,5% devido à oxidação do material carbonáceo e formação de cinza com teor de 1,3%. Porém, sob atmosfera de N<sub>2</sub> a eliminação do carbono elementar ocorreu lenta e parcialmente entre 400 °C e 900 °C ( $\Delta m = 16,9\%$ ).



Esse comportamento foi atribuído a mecanismos cinéticos de carbonização, onde os fatores tempo e temperatura influem diretamente na transferência de calor através da camada de carvão já formada, partindo-se da propagação do calor exterior pela superfície da serragem por condução, iniciando o processo de pirólise, depois os gases por convecção correm em direção oposta à transferência de calor iniciando-se a formação do carvão, sem os componentes voláteis na estrutura.

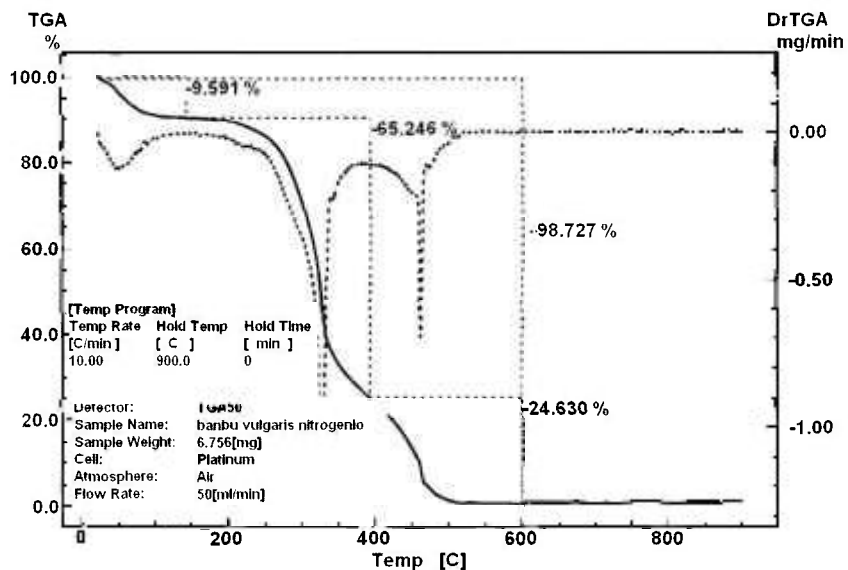


FIGURA 16 – Curva TG DTG, aquecimento de 10 °C min sob atmosfera dinâmica de ar sintético (50 mL min), da serragem do *B. vulgaris* (LATIG, 2003).

### 5.1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial

A curva DSC foi representada na FIG.17, que fornece informações relevantes sobre a temperatura de início, de “onset”, em 50,01 °C, evidenciando a liberação de água no processo como endotérmico.

Na faixa acima de 300 °C iniciou-se a carbonização através de reações exotérmicas com a decomposição térmica do *B. Vulgaris*, aparecendo o pico exotérmico ( $\Delta H = 468 \text{ J/g}$ ), à temperatura de 390,53 °C. Os produtos obtidos nesta etapa foram sujeitos a reações secundárias, sendo eles sub-produtos com características combustíveis que incluem o alcatrão, CO e CH<sub>4</sub>.

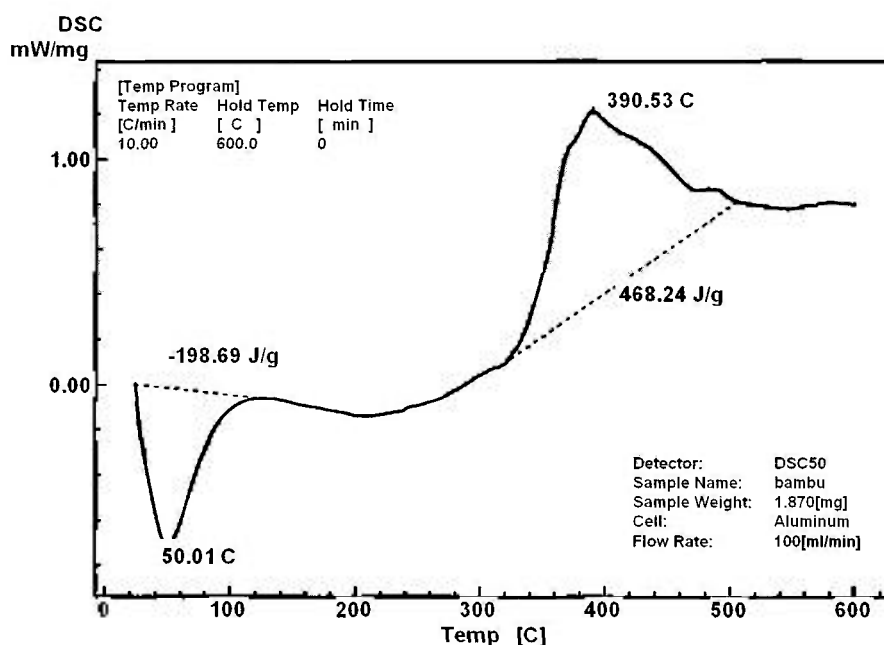


FIGURA 17 – Curva DSC da serragem do *B. vulgaris* (LATIG, 2003).

## 5.2 Análise imediata

### 5.2.1 Teor de umidade

Os resultados correspondentes ao teor de umidade, cinza, materiais voláteis e carbono fixo, da matéria-prima do *B. vulgaris*, estão apresentados na TAB.10. e os valores do carvão vegetal do *B. vulgaris* e do *E. saligna* estão apresentados na TAB.11.

TABELA 10 – Teor de umidade, cinza, materiais voláteis e carbono fixo da matéria-prima.

Análise imediata	Teor		
	Base	Mediana	Ponta
Umidade - <i>B. vulgaris</i>	33 %	36 %	29 %
Cinza - <i>B. vulgaris</i>	10 %	12 %	20 %
Materiais voláteis - <i>B. vulgaris</i>	75 %	75 %	65 %
Carbono fixo - <i>B. vulgaris</i>	15 %	13 %	15 %

Os resultados foram obtidos em duplicata na determinação dos teores de umidade, das amostras entre si não diferiram, ficando abaixo de 5% a diferença dos cálculos. A incerteza da média está estimada com 99% de confiança.

TABELA 11 – Teor de umidade, cinza, materiais voláteis e carbono fixo do carvão.

Análise imediata	Temperatura de Tratamento		
	800 (°C)	600 (°C)	400 (°C)
Umidade - <i>B. vulgaris</i> <sup>8</sup>	1,61 %	1,34 %	0,87 %
Umidade - <i>E. saligna</i> <sup>9</sup>	1,98 %	1,31 %	0,72 %
Cinza - <i>B. vulgaris</i> <sup>10</sup>	13,58 %	11,24 %	7,43 %
Cinza - <i>E. saligna</i> <sup>11</sup>	0,95 %	1,12 %	0,80 %
Materiais voláteis - <i>B. vulgaris</i> <sup>10</sup>	5,48 %	9,67 %	29,33 %
Materiais voláteis - <i>E. saligna</i> <sup>11</sup>	6,21 %	10,59 %	34,43 %
Carbono fixo - <i>B. vulgaris</i> <sup>12</sup>	80,95 %	79,08 %	61,25 %
Carbono fixo - <i>E. saligna</i> <sup>13</sup>	92,84 %	88,29 %	64,78 %

O teor de umidade é um fator que influencia na friabilidade do carvão vegetal, ou seja, quanto maior o teor de umidade da matéria-prima maior é a quantidade de finos gerados, pois torna os carvões friáveis e quebradiços, gerando material particulado (carbono), também chamado de moinha. A umidade do carvão vegetal influencia nas propriedades de resistência mecânica.

<sup>8</sup> Média de 10 repetições para o teor de umidade e cinza

<sup>9</sup> Média de 2 repetições para o teor de umidade e cinzas

<sup>10</sup> Média de 10 repetições para o teor de materiais voláteis

<sup>11</sup> Média de 2 repetições para o teor de materiais voláteis

<sup>12</sup> Média de 10 repetições para o teor de carbono fixo

Nas amostras de carvão do *B. vulgaris* e *E. saligna*, na faixa de 400 °C a 600 °C, observou-se que o teor de umidade do bambu foi mais elevado que o da madeira. Por outro lado a 800 °C verificou-se que quanto maior a temperatura as mudanças na estrutura são maiores, pois o carbono residual tende a se ordenar, sendo provável que a estrutura do *B. vulgaris* tornou-se menos porosa do que a estrutura do *E. saligna*, apresentando teor de umidade superior ao identificado nas faixas de temperaturas anteriores (FIG.19).

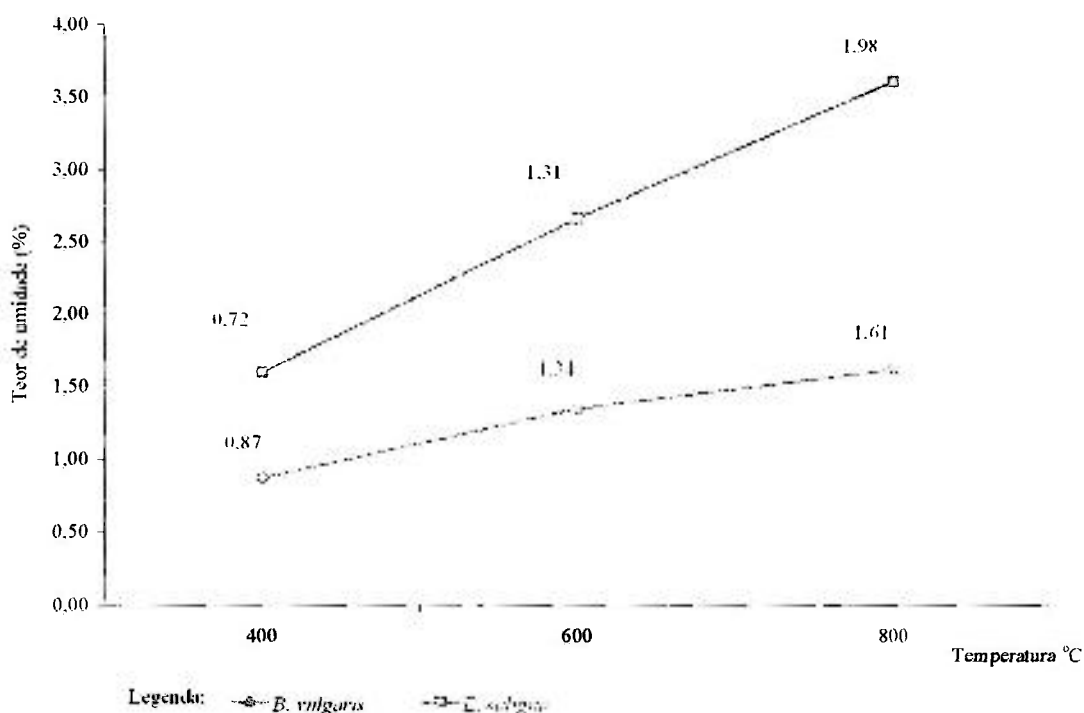


FIGURA 19 – Teor de umidade dos carvões.

O tratamento estatístico dos dados e da análise de variância estão apresentados na TAB.12 e TAB.13, com os respectivos desvios padrões ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV):



TABELA 12 – Valores médios do teor de umidade do carvão da espécie *B. vulgaris* e da espécie *E. saligna*.

Temperatura de Tratamento	Teor de umidade (%)					
	<i>B. vulgaris</i>			<i>E. saligna</i>		
	Média	$\sigma$	CV (%)	Média	$\sigma$	CV (%)
800 °C	1,61	0,87	54,28	0,72	0,29	39,99
600 °C	1,34	0,70	52,17	1,34	0,26	19,90
400 °C	0,87	0,70	80,98	1,98	0,04	1,78

Os valores foram analisados pelo teste F, e o valor de p ficou menor que 0,05% (nível de probabilidade), revelando que o teste foi estatisticamente significativo para o teor de umidade da espécie *E. saligna* ao nível de 95% de confiabilidade na interação das espécies versus temperaturas, conforme TAB.13. No entanto, o valor pelo teste F para a espécie *B. vulgaris* na análise de teor de umidade não apresentou diferença estatística significativa, pois F calculado foi menor que o F crítico.

TABELA 13 – ANOVA do teor de umidade das amostras estudadas.

Fonte da variação	SQ	gl	QM	F <sub>calc</sub>	valor -P	F <sub>crítico</sub>
<b><i>B. vulgaris</i></b>						
Entre tratamentos	0,29	2	0,14	0,2218	0,802	3,354
Dentro (resíduo)	17,50	27	0,65			
QM Residual = 4,62 X10 <sup>-4</sup>						
Total	17,79	29				
<b><i>E. saligna</i></b>						
Entre tratamentos	1,59	2	0,79	15,50	0,026	9,552
Dentro (resíduo)	0,15	3	0,05			
QM Residual = 5,12 X10 <sup>-2</sup>						
Total	1,74	5				

### 5.2.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas determinado na análise representa o material que não foi queimado, permanecendo no local do processo, porque as cinzas não são combustíveis. No caso do carvão vegetal, o teor de cinzas é sempre baixo, em relação aos teores de materiais voláteis e carbono fixo, a sua maior influência esta como catalizador na reação de C – CO<sub>2</sub>.

O teor de cinzas das amostras de *B. vulgaris* foi superior ao das amostras *E. saligna* (FIG.20).

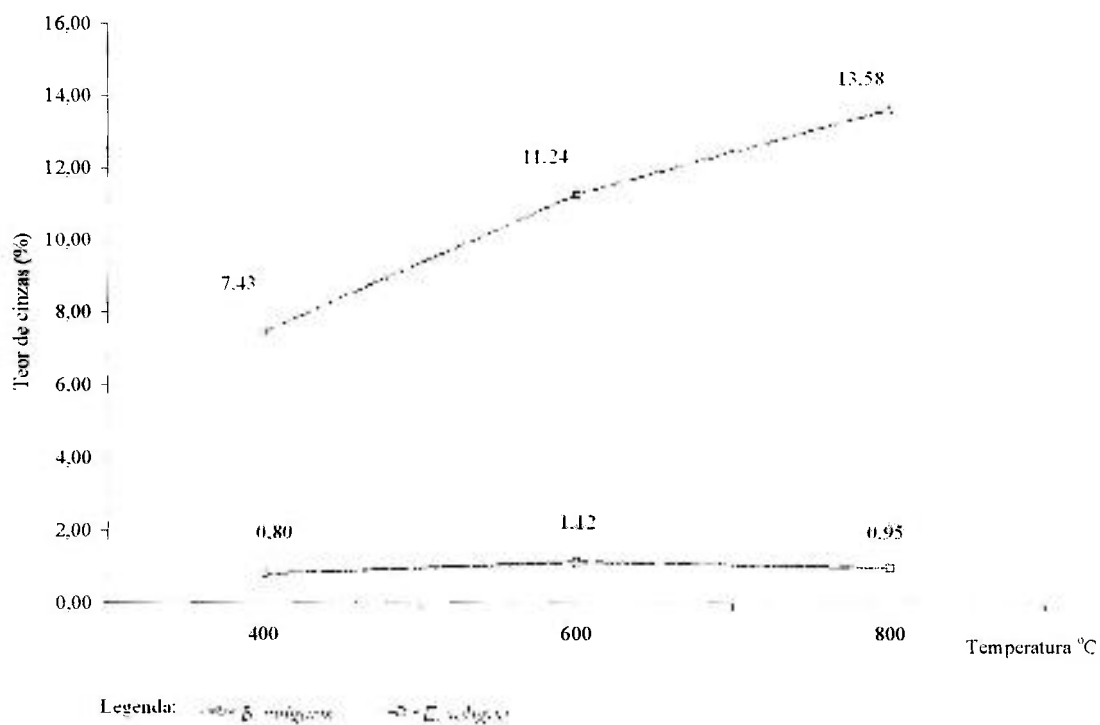


FIGURA 20 – Teor de cinzas dos carvões.

O tratamento estatístico dos dados e da análise de variância estão apresentados na TAB.14 e TAB.15, com os respectivos desvios padrões ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV):

TABELA 14 – Valores médios do teor de cinzas do carvão da espécie *B. vulgaris* e da espécie *E. saligna*

Tratamento de Tratamento	Teor de cinzas (%)					
	<i>B. vulgaris</i>			<i>E. saligna</i>		
	Média	$\sigma$	CV (%)	Média	$\sigma$	CV (%)
800 °C	13,58	3,43	25,25	0,95	0,24	25,82
600 °C	11,24	2,95	26,26	1,12	0,35	31,61
400 °C	7,43	3,56	47,92	0,80	0,01	1,50

Os valores foram analisados pelo teste F, e os valores de p ficaram menores que 0,05% (nível de probabilidade), revelando que o teste foi estatisticamente significativo para o teor de cinzas básica ao nível de 95% de confiabilidade na interação das espécies versus temperaturas, conforme TAB.15. No entanto, o valor pelo teste F para a espécie *E. saligna* na análise de teor de cinzas não apresentou diferença estatística significativa, pois F calculado foi menor que o F crítico.

TABELA 15 – ANOVA do teor de cinzas das amostras estudadas.

Fonte da variação	SQ	gl	QM	$F_{calc}$	valor -P	$F_{critico}$
<b><i>B. vulgaris</i></b>						
Entre tratamentos	296,42	2	148,21	23,61	0,000	3,354
Dentro (resíduo)	169,45	27	6,28			
QM Residual = 6,27						
Total	465,87	29				
<b><i>E. saligna</i></b>						
Entre tratamentos	0,11	2	0,05	0,8671	0,504	9,552
Dentro (resíduo)	0,18	3	0,06			
QM Residual = $5,45 \times 10^{-5}$						
Total	0,29	5				

### 5.2.3 Teor de materiais voláteis

Os resultados da análise do teor de materiais voláteis são importantes para conhecer as fases gasosas, suas quantidades e tipos de gases que são liberados e auxiliam na identificação das fases do processo e nas reações de combustão.

Nas amostras de carvão do *B. vulgaris* e *E. saligna* ocorrem vários fenômenos simultaneamente, em regiões diferentes no interior da estrutura. Podemos classificar as reações quanto aos materiais voláteis, como:

- Na faixa até 200 °C, caracterizou-se pela produção de gases não combustíveis, tais como, vapores d'água, conforme demonstrado na análise termogravimétrica;
- Na faixa de 200 °C a 400 °C observou-se reações exotérmicas;
- Na faixa de 600 °C o carvão está totalmente formado.

O *B. vulgaris* apresentou teor de materiais voláteis mais baixo, em todas as temperaturas de tratamento, com relação ao *E. saligna*, conseqüentemente quanto mais baixo o teor de voláteis, a tendência é termos um teor de carbono fixo mais alto (FIG.21).

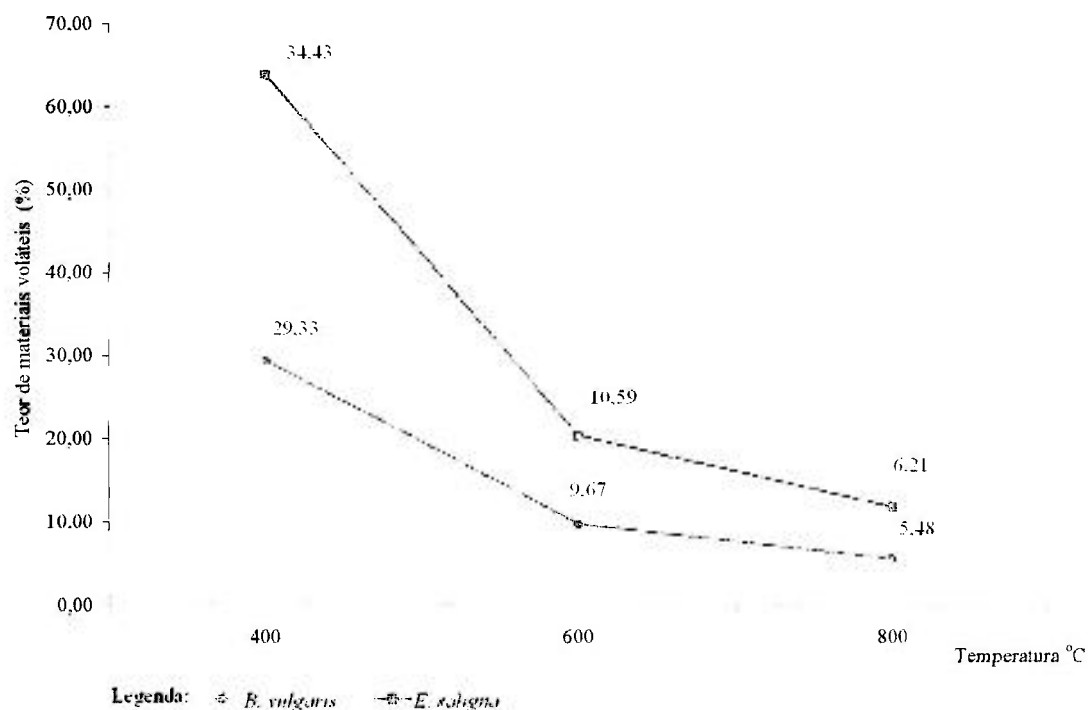


FIGURA 21 – Teor de materiais voláteis dos carvões.

O tratamento dos dados estatísticos e da análise de variância estão descritos na TAB.16 e TAB.17, com os respectivos desvios padrões ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV):

TABELA 16 – Valores médios do teor de materiais voláteis do carvão da espécie *B. vulgaris* e da espécie *E. saligna*.

Temperatura de Tratamento	Teor de materiais voláteis (%)					
	<i>B. vulgaris</i>			<i>E. saligna</i>		
	Média	$\sigma$	CV (%)	Média	$\sigma$	CV (%)
800 °C	5,48	1,26	22,97	6,21	0,25	3,98
600 °C	9,67	2,06	21,26	10,59	0,09	0,88
400 °C	29,33	4,43	15,12	34,43	0,74	2,15

Os valores foram analisados pelo teste F, e os valores de p ficaram menores que 0,05% (nível de probabilidade), revelando que o teste foi estatisticamente significativo para o teor de materiais voláteis no nível de 95% de confiabilidade na interação das espécies versus temperaturas, conforme TAB.17.

TABELA 17 – ANOVA do teor de materiais voláteis das amostras estudadas.

Fonte da variação	SQ	gl	QM	F <sub>crítico</sub>	valor -P	F <sub>crítico</sub>
<b><i>B. vulgaris</i></b>						
Entre tratamentos	2409,12	2	1204,56	150,05	0,000	3,354
Dentro (resíduo)	216,74	27	8,03			
QM Residual = 4,62 X10-4						
Total	2625,86	29				
<b><i>E. saligna</i></b>						
Entre tratamentos	922,25	2	461,13	2265,97	0,000	9,552
Dentro (resíduo)	0,61	3	0,20			
QM Residual = 0,2035						
Total	0,29	5				

#### 5.2.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é função das temperaturas de carbonização que variam de acordo com a matéria-prima, que em sua estrutura apresentam átomos de carbono após a fase de degradação da fração gasosa e da fase da fração condensável. Quanto maior o teor de carbono fixo, maiores serão o poder calorífico e sua capacidade energética.

Os resultados comparativos das amostras do *B. vulgaris* e *E. saligna* demonstraram que a madeira apresenta teor de carbono fixo mais elevado nas temperaturas de 600 °C e 800 °C do que o bambu. Porém, o carvão de *B. vulgaris* na temperatura de 400 °C destacou-se em relação a madeira (FIG.22).

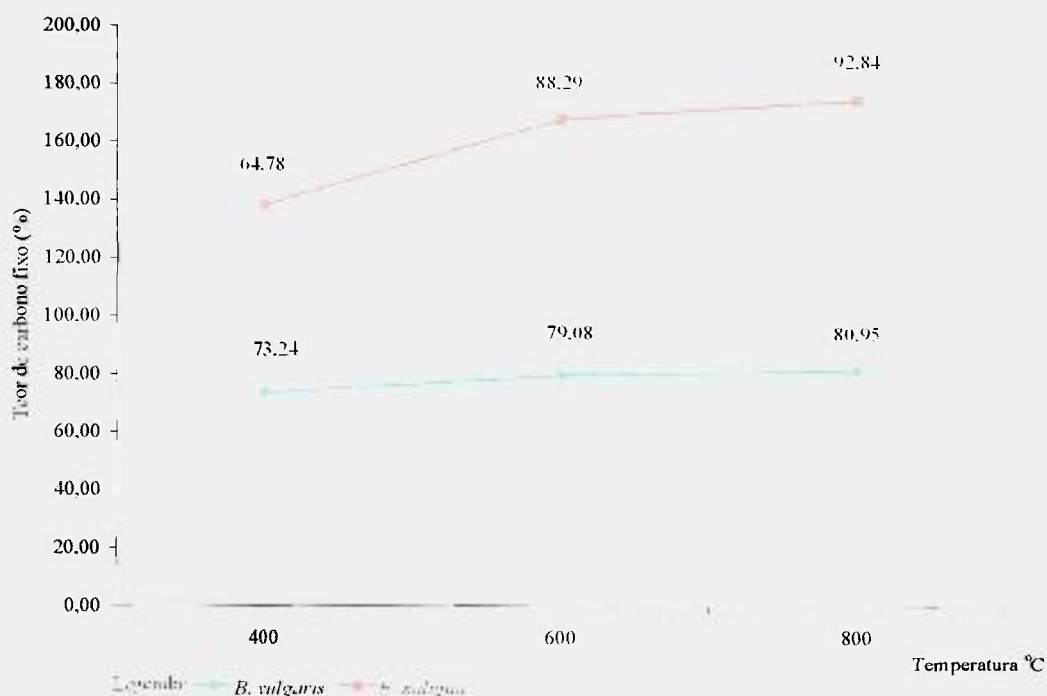


FIGURA 22 – Teor de carbono fixo dos carvões.

O tratamento dos dados estatísticos e da análise de variância estão descritos na TAB.18 e TAB.19, com os respectivos desvios padrões ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV):

TABELA 18 – Valores médios do teor de carbono fixo do carvão da espécie *B. vulgaris* e da espécie arbórea *E. saligna*.

Temperatura de Tratamento	Teor de carbono fixo (%)					
	<i>B. vulgaris</i>			<i>E. saligna</i>		
	Média	$\sigma$	CV (%)	Média	$\sigma$	CV (%)
800 °C	80,95	3,80	4,69	92,84	0,00	0,00
600 °C	79,08	4,53	5,73	88,29	0,26	0,29
400 °C	73,24	6,21	8,48	64,78	0,75	1,16

Os valores foram analisados pelo teste F, e os valores de p ficaram menores que 0,05% (nível de probabilidade), revelando que o teste foi estatisticamente significativo para o teor de carbono fixo no nível de 95% de confiabilidade na interação das espécies versus temperaturas, conforme TAB.19.

TABELA 19 – ANOVA do teor de carbono fixo das amostras estudadas.

Fonte da variação	SQ	gl	QM	$F_{calc}$	valor -P	$F_{critico}$
<b><i>B. vulgaris</i></b>						
Entre tratamentos	1384,87	2	692,43	43,4378	0,000	3,357
Dentro (resíduo)	430,40	27	15,94			
QM Residual = $4,62 \times 10^{-4}$						
Total	1815,27	29				
<b><i>E. saligna</i></b>						
Entre tratamentos	907,41	2	453,70	2123,75	0,000	9,552
Dentro (resíduo)	0,64	3	0,21			
QM Residual = $2,21 \times 10^{-2}$						
Total	908,05	5				

## 6.1 Análise química

Os resultados correspondentes à análise química com o teor de extrativos totais e lignina estão apresentados na TAB.20.

TABELA 20 – Teor de extrativos totais, lignina e holecelulose da matéria-prima.

Espécies	Teor (%)		
	Extrativos totais	Lignina	Holecelulose
<i>B. vulgaris</i> <sup>14</sup>	13,14	20,75	66,11
<i>E. saligna</i> <sup>15</sup>	4,97	25,50	69,53

A composição química do bambu e da madeira varia de acordo com a espécie escolhida, idade, condições de crescimento e época do ano.

Os principais constituintes químicos das amostras da espécie *B. vulgaris* e *E. saligna* são os carboidratos, determinados como holecelulose, lignina e várias outras substâncias denominadas de extrativos totais (resinas).

A análise química da espécie *B. vulgaris*, em comparação com *E. saligna* indicam diferenças entre o bambu e a madeira, sendo que os extrativos totais se destacaram em relação a madeira (FIG. 23).

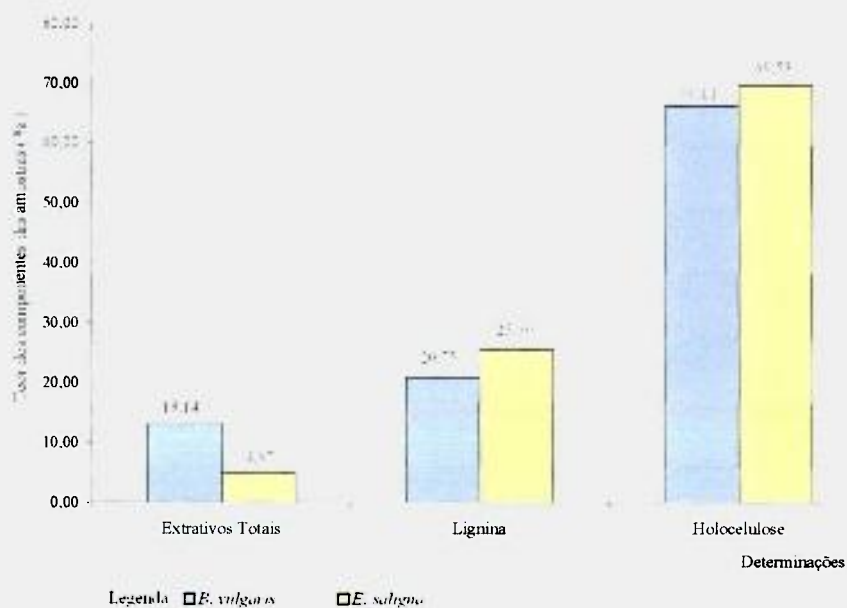


FIGURA 23 – Teor de extrativos totais, lignina e holecelulose obtidos na análise química.

<sup>14</sup> Média de 5 repetições para o teor de extrativos totais, lignina e holecelulose

<sup>15</sup> Média de 5 repetições para o teor de extrativos totais, lignina e holecelulose



O tratamento dos dados estatísticos e da análise de variância estão descritos na TAB.21 e TAB.22, com os respectivos desvios padrões ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV):

TABELA 21 – Valores médios da análise química da espécie *B. vulgaris* e da espécie arbórea *E. saligna*.

Temperatura de Tratamento	Análise química (%)					
	<i>B. vulgaris</i>			<i>E. saligna</i>		
	Média	$\sigma$	CV (%)	Média	$\sigma$	CV (%)
Extrativos totais	13,14	0,55	4,19	4,97	$4,8 \times 10^{-1}$	9,60
Lignina	20,75	1,54	7,44	25,50	1,50	6,0
Holeocelulose	66,11	1,64	2,48	69,53	1,32	1,89

Os valores foram analisados pelo teste F, e os valores de p ficaram menores que 0,05% (nível de probabilidade), revelando que o teste foi estatisticamente significativo e para a análise química no nível de 95% de confiabilidade na interação das espécies versus temperaturas, conforme TAB.22.

TABELA 22 – ANOVA para análise química das amostras estudadas.

Fonte da variação	SQ	gl	QM	$F_{calc}$	valor -P	$F_{critico}$
<b><i>B. vulgaris</i></b>						
Entre tratamentos	8202,86	2	4101,43	$2,28 \times 10^{-3}$	0,000	3,885
Dentro (resíduo)	21,54	12	1,79			
QM Residual = 1,79						
Total	8224,40	14				
<b><i>E. saligna</i></b>						
Entre tratamentos	10881,48	2	5440,74	$3,77 \times 10^{-3}$	0,000	3,885
Dentro (resíduo)	17,31	12	1,44			
QM Residual = 17,31						
Total	10898,79	14				

## 6.2 Rendimento do carvão

Os resultados correspondentes ao rendimento para as temperaturas de tratamento de 800 °C, 600 °C e 400 °C estão apresentados na TAB.23.

TABELA 23 – Teor de rendimento gravimétrico dos carvões vegetais.

Temperaturas de Tratamento	Rendimento de carvão vegetal	
	<i>B. vulgaris</i> <sup>16</sup>	<i>E. saligna</i> <sup>17</sup>
	(%)	(%)
800 °C	23,02	13,89
600 °C	25,30	17,14
400 °C	32,54	28,52

De forma geral, o aumento da temperatura de carbonização resulta em um aumento nos rendimentos de líquido e gás, com conseqüente diminuição no rendimento do carvão, isto porque há perda de voláteis, os quais migram para as fases líquida e gasosa carvão.

Os resultados comparativos das amostras do *B. vulgaris* e *E. saligna* demonstram que, o carvão produzido em temperatura menor tem um maior teor de rendimento do que o carvão produzido em temperatura mais alta, em conseqüência do teor de cinza. O comportamento do carbono fixo, como conseqüência, foi inverso, ou seja, quanto maior a temperatura maior foi o teor de carbono fixo.

Nas amostras do *B. vulgaris* e *E. saligna* identificou-se variações no rendimento, sendo que a madeira apresentou menor rendimento, logo um teor de carbono fixo maior, o que é desejável para carvões com foco energético (FIG.24).

<sup>16</sup> Média de 10 repetições do teor de rendimento

<sup>17</sup> Média de 4 repetições do teor de rendimento

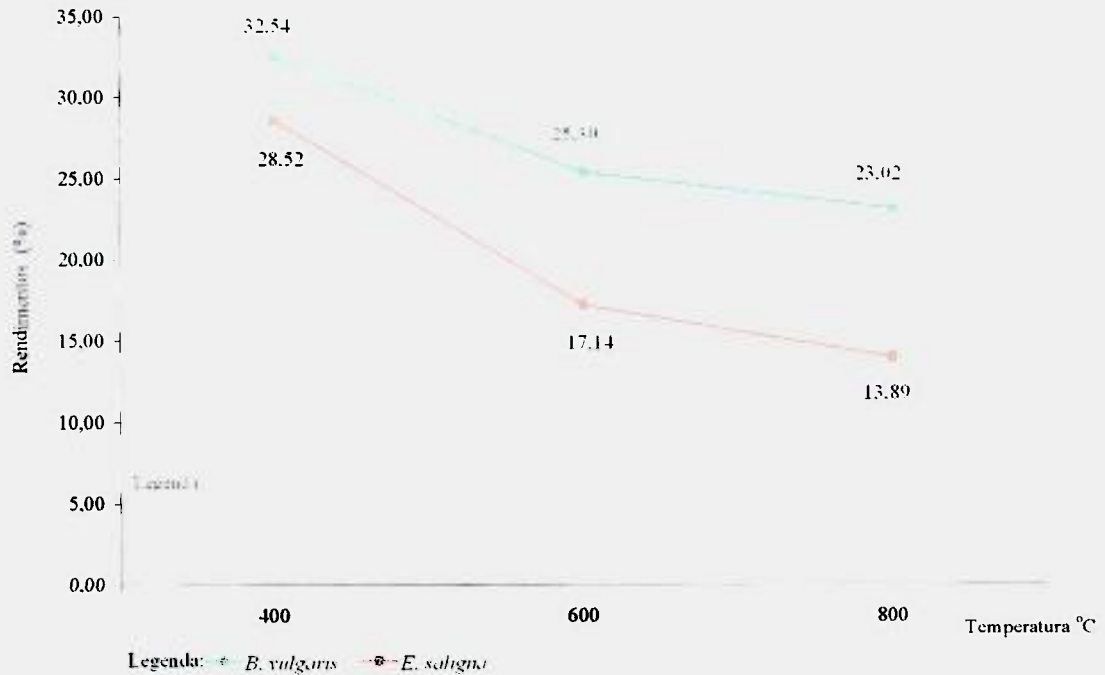


FIGURA 24 – Rendimentos dos carvões.

O tratamento estatístico dos dados e da análise de variância estão apresentados na TAB.24 e TAB.25., com os respectivos desvios padrões ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV):

TABELA 24 – Valores médios do rendimento do carvão da espécie *B. vulgaris* e da espécie *E. saligna*.

Temperatura de Tratamento	Rendimento (%)					
	<i>B. vulgaris</i>			<i>E. saligna</i>		
	Média	$\sigma$	CV (%)	Média	$\sigma$	CV (%)
800 °C	23,02	1,30	5,64	13,89	0,95	6,86
600 °C	25,30	1,24	4,88	17,14	1,24	7,25
400 °C	32,54	3,23	9,91	28,52	3,96	13,89

Os valores foram analisados pelo teste F, e os valores de p ficaram menores que 0,05% (nível de probabilidade), revelando que o teste foi estatisticamente significativo para o rendimento das amostras ao nível de 95% de confiabilidade na interação das espécies versus temperaturas, conforme TAB.25.

TABELA 25 – ANOVA do rendimento das amostras estudadas.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>QM</b>	<b>F<sub>calc</sub></b>	<b>valor -P</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>
<b><i>B. vulgaris</i></b>						
Entre tratamentos	467,64	2	233,82	48,73	0,000	3,354
Dentro (resíduo)	129,54	27	4,80			
QM Residual = 4,62 X10 <sup>-4</sup>						
Total	597,18	29				
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ<sup>18</sup></b>	<b>gl</b>	<b>QM<sup>19</sup></b>	<b>F<sub>calc</sub></b>	<b>valor -P</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>
<b><i>E. saligna</i></b>						
Entre tratamentos	468,88	2	234,44	36,58	0,000	4,256
Dentro (resíduo)	57,68	9	6,41			
QM Residual = 6,40						
Total	526,56	11				

### 6.3 Poder calorífico do carvão

Os resultados correspondentes ao poder calorífico superior para as temperaturas de tratamento de 400 °C, 600 °C e 800 °C estão apresentados na TAB.26.

TABELA 26 – Poder calorífico superior da matéria-prima original dos carvões vegetais.

<b>Temperatura de Tratamento</b>	<b>Poder calorífico superior do carvão vegetal</b>	
	<b><i>B. vulgaris</i><sup>20</sup> (kcal/kg)</b>	<b><i>E. saligna</i><sup>18</sup> (kcal/kg)</b>
800 °C	7.969	8.198
600 °C	7.401	7.684
400 °C	6.391	6.455
Matéria-prima original	4.406	4.487

<sup>18</sup> SQ = Soma de quadrados

<sup>19</sup> QM = Quadrado médio

<sup>20</sup> Média de 2 repetições para o poder calorífico superior

O poder calorífico é o principal parâmetro para expressar a capacidade de geração de energia em substituição aos combustíveis derivados do petróleo. O poder calorífico varia de acordo com o aumento da temperatura.

Os resultados de poder calorífico superior das análises indicam que, com o aumento da temperatura de carbonização, houve um aumento nos valores tanto para a *B. vulgaris* quanto para o *E. saligna*, conforme mostra a FIG.25.

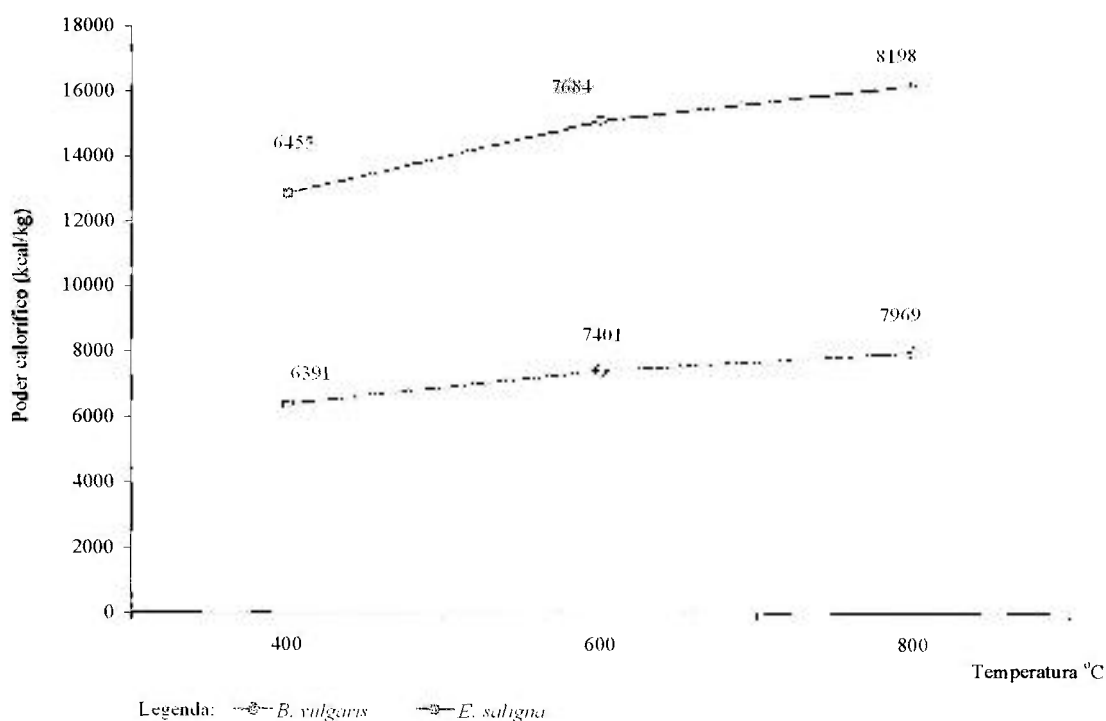


FIGURA 25 – Poder calorífico dos carvões.

O tratamento dos dados estatísticos e da análise de variância estão descritos na TAB.27 e TAB.28, com os respectivos desvios padrões ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV):

TABELA 27 – Valores médios do poder calorífico da espécie *B. vulgaris* e da espécie arbórea *E. saligna*.

Temperatura de Tratamento	Poder calorífico superior (kcal/kg)					
	<i>B. vulgaris</i>			<i>E. saligna</i>		
	Média	$\sigma$	CV (%)	Média	$\sigma$	CV (%)
800 °C	7.969	86,29	1,08	8.198	15,95	0,19
600 °C	7.401	154,90	2,08	7.684	136,73	1,78
400 °C	6.390	25,21	0,39	6.455	20,65	0,32

Os valores foram analisados pelo teste F, e os valores de p ficaram menores que 0,05% (nível de probabilidade), revelando que o teste foi estatisticamente significativo para o poder calorífico superior ao nível de 95% de confiabilidade na interação das espécies versus temperaturas, conforme TAB.28.

TABELA 28 – ANOVA do poder calorífico das amostras estudadas.

Fonte da variação	SQ	gl	QM	F <sub>calc</sub>	valor -P	F <sub>crítico</sub>
<b><i>B. vulgaris</i></b>						
Entre tratamentos	2,5 X 10 <sup>+6</sup>	2	1,2 X 10 <sup>+7</sup>	120,33	0,001	9,552
Dentro (resíduo)	3,1 X 10 <sup>+4</sup>	3	1,0 X 10 <sup>+4</sup>			
QM Residual = 10,6 X10 <sup>+3</sup>						
Total	2,5 X 10 <sup>+4</sup>	5				
<b><i>E. saligna</i></b>						
Entre tratamentos	3,2 X 10 <sup>+6</sup>	2	1,6 X 10 <sup>+6</sup>	248,78	0,000	9,552
Dentro (resíduo)	1,9 X 10 <sup>+4</sup>	3	6,4 X 10 <sup>+3</sup>			
QM Residual = 6,4 X10 <sup>+3</sup>						
Total	2,5 X 10 <sup>+4</sup>	5				

## 7 CONCLUSÕES

A partir da análise dos dados experimentais obtidos neste trabalho conclui-se que com base na determinação do poder calorífico, o carvão vegetal produzido a partir do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* tem a capacidade de ser utilizado como fonte de energia quando comparado com carvões de madeira utilizados comercialmente, portanto, sendo recomendável seu uso em aplicações comerciais.

O carvão vegetal produzido a partir de amostras de *Eucalyptus saligna* apresentou características superiores em relação ao carvão vegetal produzido a partir de amostras de *B. vulgaris* nas temperaturas de carbonização estudadas neste trabalho, mas estes resultados não inviabilizaram tecnicamente o uso do bambu como fonte energética em aplicações específicas.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar análises de densidade e porosidade dos materiais;
- Realizar análise de friabilidade (resistência a queda e abrasão);
- Realizar teste de tamboreamento;
- Realizar teste de reatividade;
- Realizar análise elementar contendo carbono, oxigênio, nitrogênio; e
- Desenvolver carvão vegetal ativado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ALBERINI, J. L. **Cultura do Bambu**; Paraná, IAPAR, 1979, p. 1-3.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Amostragem e preparação da amostra de carvão vegetal - Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 1981 (NBR 6923).
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Carvão vegetal: Determinação do Poder Calorífico*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984 (NBR 8633).
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Carvão vegetal: Determinação da Densidade Relativa Aparente, Relativa verdadeira e Porosidade*. Rio de Janeiro: ABNT, 1985 (NBR 9165).
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Carvão Vegetal: Análise Imediata*. Rio de Janeiro: ABNT, 1986 (NBR 8112).
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Peneiras para ensaio - Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 1989 (NBR 5734).
- 7 AZZINI, A.; SANTOS, R. L. e PETTINELLI, J. A. **Bambu: Material Alternativo para Construções Rurais**, Campinas, 1997, Boletim Técnico, IAC, n. 171, p. 01-18.
- 8 BATISTA, J.L.F. **Introdução a Bioestatística Florestal**. 2000. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997, n 145 a 155.
- 9 BEAL, F.C.; EICKNER, H. W. *Thermal degradation of wood components a review of the literature*. Forest Products Laboratory, 1970, p. 22.
- 10 Brasília. **Balanco Energético Nacional - BEN 2003**  
**Disponível em:** <<http://www.mme.gov.br>> acesso em 14 fev. 2004 (ver apêndice)
- 11 BERALDO, A.L.; AZZINI A. **Bambu: Características e Aplicações**, Guaíba, Livraria Editora Agropecuária, 2004, p. 37-55.
- 12 BRIANE, D. ; DOAT, J. *Guide Technique de la Carbonization*. Aix-en-Provence, EDISUD, 1985, p.180.
- 13 BRITO, J.O.; TOMAZELLO F. M.; SALGADO A. L. B. *Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu*. Piracicaba, IPEF, 1987, p. 13-17



- 14 BRITO, J.O. **Diagnóstico sobre a Cadeia Produtiva de Carvão Vegetal e Lenha do Estado de São Paulo**. 2000. Relatório – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- 15 CALLEGARI-JACQUES, S.M. **Bioestatística Princípios e Aplicações**, Porto Alegre, ARTMED, 2003, p. 158 - 159.
- 16 COOPER, D.R. **Métodos de Pesquisa em Administração**, Porto Alegre, Bookman, 2003, p. 69-182.
- 17 DUSMENY & NOYER. *L'industrie Chimique des Bois, Leurs Dérivés et Extraits Industries*. Gauthier-Villars & Cie., Imprimeurs, Paris, 1908, p.159.
- 18 FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão Vegetal – destilação, propriedades e controle de qualidade**. CETEC, Minas Gerais, 1982, p.42.
- 19 FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M E BARRICHELO, L.E.G. **Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas**. Piracicaba, IPEF, 1971, p. 65-74.
- 20 IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. Nomenclatura em análise térmica – parte II, Cerâmica, v.34, n. 163, São Paulo, São Paulo, 1988, p.3
- 21 GOMIDE J.L. Produtividade do Bambusa vulgaris em plantios da Indústria de Pápeis Santo Amaro. Relatório Técnico de Pesquisa, SIF, 1986a, p. 3-4, Viçosa.
- 22 GOMIDE J.L.; VIVONE R.R.; GALA P. A. M. Bambu: uma nova alternativa para o déficit de celulose de fibra longa no Brasil. In: ANAIS DO 21° CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 1988, ABCP, São Paulo.
- 23 Globo Rural. Onde há fumaça há lucro. São Paulo: Editora Globo, ano XVI, n.188, Jun. 2001, p.34-37.
- 24 Globo Rural. Bambu, touceiras de papel. São Paulo: Editora Globo, ano XIV, n.163, Maio. 1999, p.52-53.
- 25 KLAR, M. *Technologie de la distillation du bois*. Trad. de A. Jouve. Paris, Béranger Librairie Poly Technique CH, , 1925, p.498.
- 26 LANCHER, W. Ecofisiologia Vegetal. São Carlos, RIMA Artes e Textos, 2000, p. 69-182.
- 27 LAPPONI, J.C. **Estatística usando Excel**. São Paulo, Editora Lapponi, 2000, p. 376-377.

- 28 LIESE, W. *Bamboos: Biology, silvics, properties, utilization*, Eschborn, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1985, p. 51-52 e 72-74.
- 29 LOPEZ, O.H. Bambu - su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel, *construcción, Arquitectura, Ingeniería, Artesania*. Colombia, Estudos Técnicos Colombianos Ltda, 1974, p.41.
- 30 MELLO, M. G. Biomassa energia dos trópicos em Minas Gerais. Minas Gerais, Editora UFMG, 2001, p.151 e p 158.
- 31 OLIVEIRA, J. B.; MENK J.R.F.; LIER Q. J. e NIESTEN B. **Levantamento Pedológico Detalhado do Núcleo Experimental de Campinas**. Campinas, IAC, São Paulo, 2003.
- 32 PENEDO, W. R. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**, Série de Publicações Técnicas, CETEC, 1994, n. 8, p. 65 e 68.
- 33 PIMENTA, A.S.; BARCELLOS, D.C. **Como Produzir Carvão para Churrasco**, Boletim Técnico, CPT, 2000, n. 61.
- 34 SALGADO, A.L. de B.; AZZINI, A.; CIARAMELLO, D. e MACEDO, E. L. **Instruções Técnicas sobre Bambu**, Boletim Técnico, IAC, 1994, n. 143, p. 4-5.
- 35 REZENDE, D. **Seqüestro de Carbono: uma experiência concreta**, Goiânia, WKF Publicidade e Marketing Ltda, 2000, p. 57-59.
- 36 TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. *Preparation of wood for chemical analysis*. Atlanta: TAPPI, 1997 (T 264 cm).
- 37 TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. *Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. Atlanta: TAPPI, 1998 (T 222 om).