



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

Qualidade do carvão vegetal de madeiras do cerrado em comparação ao *Eucalyptus* sp.

Estudante: Felipe Ferreira Paulucio, matrícula 08/29188

RG: 2.665.117 – SSP – DF

CPF: 035.922.661-28

Linha de pesquisa: Tecnologia e utilização de produtos florestais

Orientador: Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Brasília-DF, 19 de dezembro de 2012.



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

Qualidade do carvão vegetal de madeiras do cerrado em comparação ao *Eucalyptus* sp.

Felipe Ferreira Paulucio

Ailton Teixeira do Vale
(Orientador)

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Brasília-DF, 19 de dezembro de 2012.



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

Qualidade do carvão vegetal de madeiras do cerrado em comparação ao *Eucalyptus* sp.

Estudante: Felipe Ferreira Paulucio, matrícula 08/29188

Menção: SS

Aprovado por:

Prof. MSc. Frederico de Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Brasília

Prof. Dr. Ildeu Soares Martins
Universidade de Brasília

Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale
Universidade de Brasília
Orientador

Brasília-DF, 19 de dezembro de 2012.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.2. Objetivo Geral	2
1.2.1. Objetivo Específico	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Espécies Estudadas	2
2.1.1. <i>Pterodon pubescens</i> (Benth) Benth, Leguminosae, Papilionoidea – Sucupira Branca	2
2.1.2. <i>Copaifera langsdorffii</i> Desf, Leguminosae, Caesalpinoideae – Copaíba	3
2.1.3. <i>Sclerolobium paniculatum</i> Vog. var. <i>subvelutinum</i> Benth, Leguminosae, Caesalpinoideae – Carvoeiro	3
2.1.4. <i>Qualea grandiflora</i> Mart, Vochysiaceae – Pau-Terra- Grande	4
2.1.5. <i>Vochysia ferruginea</i> Mart, Vochysiaceae – Quaruba	4
2.1.6. <i>Caryocar brasiliense</i> A. St.-Hill, Caryocaraceae – Pequi	4
2.1.7. <i>Pisonia</i> sp.	5
2.1.8. <i>Eucalyptus</i> sp.	5
2.2. Carvão Vegetal	6
2.2.1. Aspectos Gerais	6
2.2.2. Processo de Carbonização	7
2.2.3. Caracterização do Material Combustível	9
2.2.3.1. Poder Calorífico	9

2.2.3.2.	Análise Imediata	10
a.	Teor de Umidade	10
b.	Teor de Cinza	11
c.	Teor de Matéria Volátil	11
d.	Teor de Carbono Fixo	11
2.2.3.3.	Constituição Química	12
2.2.4.	Carvão Vegetal e Indústria Siderúrgica	12
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1.	Espécies Analisadas	14
3.2.	Coleta do Material	14
3.3.	Obtenção das Amostras	16
3.4.	Caracterização dos Carvões	18
3.4.1.	Análise Imediata	18
3.4.1.1.	Teor de Cinzas	19
3.4.1.2.	Teor de Matérias Voláteis	20
3.4.1.3.	Teor de Carbono Fixo	21
3.4.2.	Poder Calorífico	22
3.4.3.	Análise Estatística	23
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1.	Análise Imediata	23
4.1.1.	Teor de Matéria Volátil	23
4.1.2.	Teor de Cinzas	25
4.1.3.	Teor de Carbono Fixo	26
4.2.	Poder Calorífico Superior (PCS)	27
5.	CONCLUSÕES	29
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Modelo de carbonização de Kanury e Blackshear (OLIVEIRA <i>et al.</i>, 1982)	8
Figura 2:	Forno RAC 220 da Votorantim Siderurgia	16
Figura 3:	Ilustração de mapa térmico obtido por instrumentação em fornos RAC 220 da Votorantim Siderurgia (CARVALHO, S. R., 2012, <i>apud</i> MELIDO, R. C. N., 2012)	16
Figura 4:	A – Moinho de facas Marconi (MA 680); B – Estufa Marconi (MA 035)	17
Figura 5:	Mufla Quimis (Q.313.24)	17
Figura 6:	Agitador de Peneiras para Análise Granulométrica Bertel	18
Figura 7:	Mufla Quimis (Q.318.24) com os cadinhos contendo as amostras para análise do teor de cinzas	19
Figura 8:	Análise do teor de matéria volátil. A – Cadinhos, sem tampa, na porta da Mufla Quimis (Q.318.24); B – Cadinhos, com tampa, no interior da Mufla Quimis (Q.318.24)	21
Figura 9:	A – Estufa Fanem (315 SE) com as amostras em pratos de alumínio; B – Amostras acondicionadas em dessecador; C – Balança Bel (UMARK 210 Classe I)	22
Figura 10:	Bomba calorimétrica IKA (C2000 Basic) acoplado a aparelho para banho de refrigeração IKA (KV 600 Digital)	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Produtos da carbonização (GOMES; OLIVEIRA, 1980)	6
Tabela 2:	Teor de matéria volátil dos diferentes tratamentos	24
Tabela 3:	Teor de cinzas dos diferentes tratamentos	25
Tabela 4:	Teor de carbono fixo dos diferentes tratamentos	26
Tabela 5:	Poder calorífico superior dos diferentes tratamentos	28
Tabela 6:	Poder calorífico superior, teor de carbono fixo, teor de cinzas e teor de material volátil dos diferentes tratamentos	28

RESUMO

O crescente uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica levantou questões como a influência da qualidade do carvão de diferentes espécies no processo produtivo em altos-fornos e os prejuízos ambientais relacionados ao desmatamento de matas nativas para obtenção de matéria prima. Diante dessa problemática, este estudo teve por objetivo realizar a comparação da qualidade do carvão de *Eucalyptus* sp. e de espécies nativas do cerrado produzidos via processos distintos, em laboratório e em forno industrial. Coletou-se a madeira das espécies *Pterodon pubescens*, *Copaifera langsdorffii*, *Sclerolobium paniculatum*, *Qualea grandiflora*, *Vochysia ferruginea*, *Caryocar brasiliense*, *Pisonia* sp. e *Eucalyptus* sp. na Fazenda Água Limpa (FAL), Brasília-DF, para produção de carvão em laboratório. O carvão de espécies nativas do cerrado e de *Eucalyptus* sp. gerados via fornos industriais, por sua vez, foram fornecidos pela Companhia Votorantim Siderurgia, Vazante-MG. De posse das amostras de material carbonizado, conduziram-se as análises de teor de cinzas, de matéria volátil, de carbono fixo e de poder calorífico superior dos diferentes tratamentos. Para o carvão de *Eucalyptus* sp. e o de mistura de espécies do cerrado produzidos em laboratório, apenas o teor de cinzas registrou diferença significativa entre os tratamentos. Nos testes realizados nas amostras de carvão produzidas em forno industrial, no entanto, a 5% de significância, somente o teste de teor de matéria volátil foi considerado igual. A partir dos resultados obtidos para o carvão vegetal fornecido pela Votorantim Siderurgia, classificou-se o de mistura de espécies do cerrado como de qualidade inferior para o uso siderúrgico, quando comparado ao eucalipto.

Palavras-chave: carvão vegetal, cerrado, análise imediata e poder calorífico.

ABSTRACT

Continuous increase in charcoal use in steel industry has raised some issues: the effect of charcoal quality from different woods species on production in blast furnaces, and the deforestation problems related to the search for raw material. Therefore, this study aims to compare the charcoal quality of native cerrado species and *Eucalyptus* sp.. Both charcoals have been produced in different processes, in a laboratory and in an industrial furnace. For this study, wood from the species *Pterodon pubescens*, *Copaifera langsdorffii*, *Sclerolobium paniculatum*, *Qualea grandiflora*, *Vochysia ferruginea*, *Caryocar brasiliense*, *Pisonia* sp. and *Eucalyptus* sp. was collected at Fazenda Água Limpa (FAL), Brasília-DF, and used for charcoal production in the laboratory. By contrast, wood from native cerrado species and *Eucalyptus* sp. was provided and turned into charcoal using the industrial furnace by the Votorantim Siderurgia Company, Vazante-MG. The carbonized material samples were then subjected to four tests: fixed carbon, volatile matter, ashes and superior calorific value. Only the ash content test registered a significant difference between laboratorial charcoal from *Eucalyptus* sp. and from a mixture of cerrado species. However, samples produced in the industrial furnace were only considered equal at a level of 5% significance in the volatile matter test. The results from industrial samples show that charcoal mixture of cerrado species is worse for steel industry use than *Eucalyptus* sp. charcoal.

Key words: charcoal, cerrado, immediate analysis, calorific value.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o carvão vegetal e a lenha representam 9,7% do total de energia ofertada internamente, essa marca os coloca atrás apenas das fontes derivadas da cana (15,7%), hidráulicas (14,7%) e energias não renováveis (55,9%) (BRASIL, 2012). Vale (2000a), baseado na extensão do bioma e na densidade demográfica da região, sugere o cerrado brasileiro como o maior fornecedor de lenha para uso residencial. Além de suprir a demanda residencial urbana e rural, o carvão vegetal destina-se, prioritariamente, ao atendimento de diversos setores da indústria, tais como Metalurgia, Siderurgia e Cimento (BRITO, 1999).

Com a crise do petróleo, as energias renováveis vêm ganhando força, pois possuem a capacidade de substituir, ao menos parcialmente, aquelas de origem fóssil (PUENTES, 2010). O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) declarou terem sido produzidos, aproximadamente, 3,5 milhões de toneladas de carvão vegetal em 2010. Valorizou-se essa produção em pouco mais de 1,6 bilhões de reais (IBGE, 2010).

De acordo com Duboc *et al.* (2007), existe grande discrepância entre a área destinada ao reflorestamento e a demanda de madeira para produção de carvão vegetal e lenha, o que causa elevada pressão sobre os remanescentes florestais. Em média, todos os anos, desmatam-se 3,1 milhões de hectares no Brasil (FAO, 2007) em virtude, principalmente, da expansão da fronteira agrícola, do desmatamento comercial e da construção de estradas (UHLIG, 2008).

Em sentido oposto aos preceitos de sustentabilidade ambiental e social, a principal fonte de matéria-prima utilizada, hodiernamente, na produção de carvão vegetal encontra-se no aproveitamento dos resíduos do desmatamento junto às fronteiras de desenvolvimento agrícola. Obtém-se cerca de 50% do material empregado na produção de carvão vegetal a partir de florestas nativas, em especial de áreas do cerrado (IBGE, 2006; DUBOC *et al.*, 2007).

Uhlig *et al.* (2008), ao confrontarem dados do IBGE e da Associação Mineira de Silvicultura – AMS, concluíram que, em 2005, cerca de 1,3 milhões de toneladas de carvão vegetal utilizados não possuíam sua origem declarada. Além disso, aponta-se que, nesse mesmo ano, desmataram-se, ilegalmente, 245 mil hectares para fornecer carvão vegetal às indústrias siderúrgicas.

O rendimento e o padrão de qualidade do material produzido pelas indústrias siderúrgicas estão diretamente relacionados ao carvão vegetal utilizado. O equipamento, a

condição operacional da carbonização e o material de origem determinam, de forma complexa, a qualidade do carvão. A variabilidade da qualidade energética do material combustível proporciona elevado desperdício de matéria-prima e prejudica o produto final, pois interfere na operacionalização dos altos-fornos siderúrgicos (REIS *et al.*, 2012).

1.2. Objetivo Geral

Em face da importância das características do carvão para a indústria siderúrgica e do alto nível de desmatamento de áreas nativas do cerrado provocado pelo setor, torna-se imprescindível estudar a qualidade do carvão vegetal para verificar a sustentabilidade da produção.

1.2.1. Objetivo Específico

O presente estudo teve como objetivo realizar a comparação dos resultados de análise imediata e poder calorífico de amostras de carvão de *Eucalyptus* sp. e de espécies nativas do cerrado produzidos via processos distintos, em laboratório e em forno industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Espécies Estudadas

2.1.1. *Pterodon pubescens* (Benth) Benth, Leguminosae, Papilionoidea – Sucupira Branca

A espécie *Pterodon pubescens* ocorre no cerrado sentido restrito e no cerradão, associada aos solos distróficos, no DF, BA, GO, MA, MG, MT, MS, PI, SP e TO. Apresenta troncos de até 46 cm de diâmetro. Sua madeira é amarelada, com densidade básica média de 0,75 g/cm³, dura e altamente resistente ao ataque de fungos xilófagos (REIS, 1985; RIZZINI, 1971; SILVA JÚNIOR, 2005).

Vale *et al.* (2011) sugeriram em seu estudo que a madeira de sucupira branca seja, preferencialmente, utilizada em construções de estruturas que exijam elevada estabilidade e considerável resistência mecânica. Segundo Vale *et al.* (2002a), a Sucupira Branca possui poder calorífico superior (PCS) igual a 4.953 kcal/kg.

2.1.2. *Copaifera langsdorffii* Desf, Leguminosae, Caesalpinoideae – Copaíba

A espécie *Copaifera langsdorffii* ocorre no cerrado sentido restrito, matas de galeria, matas secas e cerradões, no DF, CE, GO, MA, MG, MS, MT, PA, PR, SP e TO. É popularmente conhecida como copaíba, copaibeira, pau-de-óleo e óleo-de-copaíba. Seu tronco pode chegar a 33 cm de diâmetro, com densidade básica aproximada de 0,79 g/cm³ (SILVA JÚNIOR, 2005). O gênero *Copaifera* registra, de forma geral, 4.512 kcal/kg de poder calorífico superior (IPT, 1937).

Assim como outros óleos obtidos de diferentes espécies do gênero *Copaifera*, considera-se o óleo-resina extraído de *C. langsdorffii* um valioso remédio na medicina popular, daí a razão para seu elevado uso regional. Credita-se a essa essência características anti-inflamatórias e de agente anti-infeccioso pulmonar (PAIVA *et al.*, 1998; PAULA; ALVES, 2007; SILVA JÚNIOR, 2005).

2.1.3. *Sclerolobium paniculatum* Vog. var. *subvelutinum* Benth, Leguminosae, Caesalpinoideae – Carvoeiro

A espécie *Sclerolobium paniculatum* ocorre no cerrado sentido restrito e no cerradão distrófico, no DF, AM, BA, GO, MA, MG, MS, MT, PA, PI e TO. É popularmente conhecida como velame, pau-bosta, carvoeiro, carvão-de-ferreiro, entre outros. Seu tronco pode chegar a 36 cm de diâmetro, com densidade básica entre 0,66 e 0,74 g/cm³ (SILVA JÚNIOR, 2005; Vale *et al.*, 1992). Segundo Vale *et al.* (2002a), o carvoeiro possui poder calorífico superior (PCS) igual a 4.849 kcal/kg.

Em estudo recente, Oliveira *et al.* (2008) atentaram para a elevada pressão antrópica sofrida pelo carvoeiro em todas as fitofisionomias em que ocorre devido à sua ampla utilização como lenha e em obras civis na zona rural. Thompson (2009), por sua vez, observa a potencialidade da espécie para o uso de forma sustentável em área de cerrado sentido restrito em virtude da sua alta produtividade nessa fitofisionomia.

2.1.4. *Qualea grandiflora* Mart, Vochysiaceae – Pau-Terra-Grande

A espécie *Qualea grandiflora* ocorre vastamente distribuída no cerrado sentido restrito e no campo cerrado, campo sujo e cerradões, no DF, AM, BA, GO, MA, MG, MS, MT, PA, PI, SP e TO. É popularmente conhecida como pau-terra, pau-terra-do-campo, pau-terra-da-folha-larga e pau-terra-do-cerrado. Seu tronco pode chegar a 32 cm de diâmetro (FERREIRA *et al.*, 2001; SILVA JÚNIOR, 2005). Vale *et al.* (2002a) quantificaram o poder calorífico superior da *Q. grandiflora* em 4.736 kcal/kg.

O pau-terra apresenta elevado potencial de uso para fins medicinais, apícolas, ornamentais e tintoriais. Sua madeira, ademais, é utilizada regionalmente (MOREIRA; GUARIM NETO, 2009; RONDON NETO *et al.*, 2010). Por fim, *Qualea* spp. também é conhecido por integrar o rol de espécies do cerrado acumuladoras de alumínio (HARIDASAN, 2008).

2.1.5. *Vochysia ferruginea* Mart, Vochysiaceae – Quaruba

A espécie *Vochysia ferruginea* ocorre no cerrado sentido restrito e cerradões, no DF, AC, GO, MA, MT, PA. É popularmente conhecida como cedro rana, jutai mirim, quaruba, cajarana, cajazeira, entre outros. Seu tronco pode chegar a 72,12 cm de diâmetro, com densidade básica igual a 0,41 g/cm³ (ARAÚJO, 2002; FRANÇA, 2010). Devido à leveza da madeira, a Quaruba aceita pregos e apresenta alborno muito fácil de ser tratado com creosoto (oleossolúvel) e com CCA-A (hidrossolúvel) (LPF, 2012).

Assim como a *Qualea grandiflora*, as espécies do gênero *Vochysia*, da família Vochysiaceae, possuem a característica de acumular alumínio (HARIDASAN, 2008).

2.1.6. *Caryocar brasiliense* A. St.-Hill, Caryocaraceae – Pequi

A espécie *Caryocar brasiliense* possui vasta distribuição no campo cerrado, campo sujo, cerrado sentido restrito e cerradão distrófico, no DF, BA, CE, GO, MA, MG, MT, MS, PA, PI, PR, SP e TO. É popularmente conhecido como pequi, pequiá, pequiá-bravo, grão-de-cavalo, entre outros. Seu tronco pode chegar a 58 cm de diâmetro, com densidade básica próxima a 0,9 g/cm³ (PAULA; ALVES, 2007; SILVA JÚNIOR, 2005). Sua madeira é de

ótima qualidade, moderadamente pesada e de boa durabilidade, sendo utilizada como moirões e lenha; própria para xilografia, construção civil e naval, dormentes, fabricação de móveis e fonte de carvão para siderurgias. Vale *et al.* (2002a) quantificaram o poder calorífico superior do *C. brasiliense* em 4.839 kcal/kg.

O pequizeiro é considerado uma espécie de interesse econômico, principalmente devido ao uso de seus frutos na culinária, como fonte de vitaminas e na extração de óleos para a fabricação de cosméticos. Na medicina popular, é utilizado para tratamento de problemas respiratórios; como afrodisíaco; e suas folhas são adstringentes, além de estimular a produção da bÍlis (ALMEIDA; SILVA, 1994; SILVA JÚNIOR, 2005).

2.1.7. *Pisonia* sp.

Pisonia é um gênero botânico pertencente à família Nyctaginaceae. A madeira de *Pisonia* spp. é macia e apresenta baixa resistência mecânica, degradando-se rapidamente quando as árvores caem. A família Nyctaginaceae encontra-se representada em todo o país por gêneros nativos.

2.1.8. *Eucalyptus* sp.

Originário da Austrália, Indonésia e ilhas próximas, segundo Rapassi *et al.* (2008), o gênero *Eucalyptus* ssp. possui mais de 600 espécies, capazes de se desenvolverem em diversas condições de solo e clima. A maioria delas atinge altura entre 30 e 50 metros, típicas de florestas altas, e 10 e 25 metros, características de florestas abertas. *E. grandis*, *E. saligna* e *E. urophylla* são os principais exemplares cultivados em regiões de clima tropical (EMBRAPA, 2003). Devido a essas características, esse gênero atende a requisitos tecnológicos dos mais diversos setores na produção industrial madeireira (ABREU *et al.*, 2007).

A área destinada ao plantio de eucalipto no Brasil chega a 4.873.952 hectares, estando a maior parte localizada nos estados de Minas Gerais e São Paulo (ABRAF, 2012). Paiva *et al.* (2001) sugerem as seguintes espécies de eucalipto para a produção de carvão: *Eucalyptus camaldulensis*, *E. urophylla*, *E. tereticornis*, *E. pellita*, *E. cloeziana*, *E. citriodora*, *E. maculata*, *E. pilularis*, *E. grandis* e *E. saligna*. O poder calorífico superior do gênero

Eucalyptus varia de 4.217 kcal/kg a 5.023 kcal/kg (CASTILHO; ALZOLA, 1988; IPT, 1937; JARA, 1989).

2.2. Carvão Vegetal

2.2.1. Aspectos Gerais

Há séculos, nas cavernas, o homem primitivo, ao descobrir que a queima da madeira com aspecto preto e friável produzia menor quantidade de chama e fumaça e gerava maior quantidade de calor que a queima direta da madeira, deu início à produção do carvão vegetal. A carbonização da madeira, mais precisamente, o aquecimento do material lenhoso ao abrigo do ar até sua parcial decomposição, gera o resíduo sólido denominado carvão vegetal. Além das propriedades físicas e químicas inerentes à matéria-prima, a técnica utilizada para sua obtenção determina as características do carvão vegetal, ditando os usos preponderantes para os quais ele se destina (BENITES *et al.*, 2009; BRITO, 1999; COELHO, 2008).

A carbonização também libera produtos voláteis, denominados produtos da destilação da madeira, que podem ou não ser condensáveis (Tabela 1). Emprega-se o termo destilação seca, em vez de carbonização, quando a recuperação desses produtos químicos é o fator determinante para a exploração econômica do processo (BRITO; BARRICHELLO, 1981).

Tabela 1 – Produtos da carbonização (GOMES; OLIVEIRA, 1980).

Produtos da carbonização	% base seca
Carvão (80% carbono fixo)	33,0
Ácido pirolenhoso	35,5
Ácido Acético	5,0
Metanol	2,0
Alcatrão Solúvel	5,0
Água e outros	23,5
Alcatrão insolúvel	6,5
Gases Não Condensáveis (GNC)	25,0
Hidrogênio – 0,63%	0,16
CO – 34%	8,5
CO ₂ – 62%	15,5

Metano – 2,43%	0,61
Etano – 0,13%	0,03
Outros – 0,81%	0,20
Total	100,00

Mais de 90% do total de carvão vegetal produzido no mundo destina-se à produção de energia em decorrência do seu alto poder calorífico, do intenso processo de combustão, estável e prolongado, e da facilidade de ignição. Utiliza-se o restante como ingrediente de ração de gados, remédio para dores intestinais, base para a pólvora negra, entre outros (JUVILLAR, 1980; PINHEIRO, 1980).

Duboc *et al.* (2007), por sua vez, apontam para o problema vivenciado pelo Brasil, atualmente, na produção de carvão, qual seja, a origem da matéria-prima. Os autores, além de analisarem a evolução do setor madeireiro para fins energéticos, atentaram não só para os aspectos ambientais, mas para as condições desumanas associadas às unidades de produção de carvão.

2.2.2. Processo de Carbonização

Apesar de existirem vários modelos de carbonização, o mais utilizado é o proposto por Kanury e Blackshear (Figura 1). De acordo com ele, o processo de carbonização pode ser dividido em cinco etapas, períodos (OLIVEIRA *et al.*, 1982).

Período I ($t_0 < t < t_1$): inicia-se o processo à temperatura ambiente, aumentando-a gradativamente da superfície para o centro, secando o material lenhoso. A madeira não sofre qualquer alteração. O calor se propaga por condução.

Período II ($t_1 < t < t_2$): ocorrem as primeiras modificações na madeira, formam-se a frente de pirólise e, posteriormente, a zona ou camada de pirólise. Os gases quentes formados na zona de pirólise transportam o calor para o exterior da peça por convecção.

Período III ($t_2 < t < t_3$): formam-se a frente de carvão e, mais tarde, a zona de carvão. Gases mais pesados formados na carbonização sofrem decomposição no leito do carvão quente. Gases mais leves passam para o exterior e encontram o oxigênio da atmosfera, o que

resulta na combustão. A transferência de calor na zona do carvão se processa através da condução e convecção.

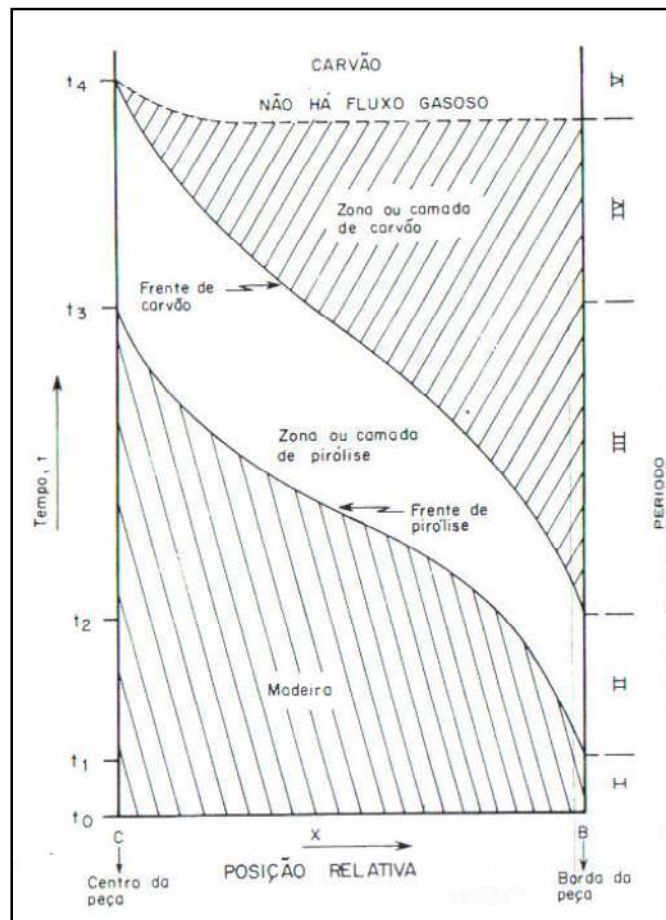


Figura 1: Modelo de carbonização de Kanury e Blackshear (OLIVEIRA *et al.*, 1982).

Período IV ($t_3 < t < t_4$): caracteriza-se pelo desaparecimento da madeira em seu estado original. A zona de carvão é predominante, restando apenas uma parte da zona de pirólise.

Período V ($t > t_4$): a frente de carvão alcança o centro da peça ao formar uma única camada, a camada de carvão. Cessa-se o fluxo gasoso.

Além de ser impossível controlar o processo de carbonização de forma perfeita, tem-se a queima de parte da carga para gerar calor para dentro do forno. Em virtude disso, o rendimento gravimétrico do processo de carbonização é pouco superior a 30%, a depender da temperatura e do forno utilizado (LEPAGE, 1986).

Uma preocupação é a redução da quantidade de tiço produzida. Tiço é definido como material semicarbonizado, de menor poder calorífico que o carvão vegetal e indesejável no processo de carbonização. Entre outras possibilidades, pode ocorrer devido à carbonização

mal conduzida, à interrupção do processo antes da completa carbonização, à grande dimensão das peças. Geralmente, está associado à baixa condutividade térmica da madeira e à própria formação do carvão, que atua como isolante térmico para as regiões mais internas das peças de madeira (OLIVEIRA *et al.*, 1982).

2.2.3. Caracterização do Material Combustível

Muitos autores consideram o poder calorífico, a densidade e a análise imediata como as informações mais importantes na análise do desempenho da madeira na geração de energia. Cita-se, como exemplo, o trabalho de Vale *et al.* (2000b), que, ao analisarem as espécies *Sclerolobium paniculatum*, *Pterodon pubescens* e *Dalbergia miscolobium*, nativas do cerrado, classificaram-nas como madeiras de excelente qualidade para a produção de energia na forma de calor. Os autores chegaram a essa conclusão devido ao elevado poder calorífico e massa específica encontrada. Observaram-se, ainda, teores de carbono fixo acima da média e teores de matérias voláteis abaixo da média, possibilitando um maior tempo de residência das espécies em aparelho de queima.

Ressalta-se que Cunha *et al.* (1989) defendem que não há qualquer correlação entre densidade básica e o poder calorífico, quando a unidade é kcal/kg. Entretanto, a vantagem da utilização de madeira com alta densidade abriga-se na relação direta entre densidade e conteúdo calórico da madeira por unidade volumétrica.

2.2.3.1. Poder Calorífico

De acordo com Jara (1985), define-se o poder calorífico como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa do material combustível. O conteúdo energético das biomassas é quantificado pela unidade do poder calorífico (kcal/kg). As características de calor, fumaça e cinzas geradas na combustão são bastante influenciadas pelas composições químicas do material (ROCCO, 2011). A umidade da madeira, entre outras características, influencia no valor do seu poder calorífico. Quanto menor o teor de umidade da madeira, maior será a produção de calor por unidade de massa. (VALE *et al.*, 2000c).

O poder calorífico divide-se em Superior, Inferior e Útil. O Poder Calorífico Superior (PCS) é aquele que considera o calor de vaporização da água, mais precisamente, o PCS compreende a soma da energia liberada por uma unidade de massa seca a 0% de umidade, na forma de calor, e a energia, na forma de calor latente de vaporização, da água de constituição que é recuperada. Quando se desconta o calor de vaporização da água, obtém-se o Poder Calorífico Inferior (PCI). O Poder Calorífico Útil (PCU) é aquele em que deve ser descontado o calor de vaporização da umidade (GENTIL, 2008).

Além da umidade, segundo Jara (1989), a constituição química da madeira influencia seu poder calorífico superior, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, entre outros). O carvão vegetal possui maior PCS, pois em sua composição há, relativamente, mais elementos cuja estrutura molecular é mais resistente à degradação térmica, como os anéis aromáticos que formam a lignina. Os elementos com ligações menos estáveis que compõem a madeira são degradados durante o processo de carbonização (SOARES, 2011).

Ademais, o PCS do carvão vegetal relaciona-se diretamente com o seu teor de carbono fixo. Destarte, assim como o carbono fixo, o poder calorífico superior apresenta correlação positiva com a temperatura de carbonização (VALE *et al.*, 2002b).

2.2.3.2. Análise Imediata

A análise imediata é comumente utilizada para quantificar características do material combustível atreladas à produção de energia. Esta consiste em determinar os teores de umidade, de cinzas, de materiais voláteis e, por fim, por meio de diferença, o teor de carbono fixo.

a. Teor de Umidade

O controle de umidade da madeira a ser utilizada é imprescindível para não gerar carvões friáveis e atribuir maior valor agregado ao material combustível produzido. Ao ser liberada, a elevada quantidade de vapor d'água propicia o aumento da pressão nos poros, resultando em carvões quebradiços, friáveis. Cunha *et al.* (1989) prelecionam que o processo de evaporação da umidade absorve energia em combustão e, com isso, reduz o poder de combustão da madeira.

b. Teor de Cinzas

Denomina-se teor de cinza, ou teor de minerais, o material residual inorgânico da completa combustão do carvão vegetal. A cinza residual nas fornalhas das indústrias é indesejável, pois, além de reduzir o poder calorífico do carvão vegetal, enseja limpezas frequentes, podendo provocar corrosão nos equipamentos metálicos e comprometer a qualidade do ferro-gusa devido ao fenômeno da segregação (SANTOS, 2008; ASSIS *et al.*, 2012; PEREIRA *et al.*, 2000; GENTIL, 2008).

O teor de cinzas da madeira corresponde, geralmente, a menos de 1% da base de madeira absolutamente seca. Essa característica é influenciada pela idade do indivíduo, com o aumento da idade, há forte tendência de redução do nível de minerais na madeira e, conseqüentemente, no carvão. Além disso, as diferentes técnicas de plantio associadas aos inúmeros insumos empregados podem influenciar no teor de cinza da madeira e do carvão (ASSIS *et al.*, 2012). Os principais minerais encontrados são cálcio, potássio, magnésio, fósforo e silício. (BARCELLOS *et al.*, 2005; KLOCK *et al.*, 2005).

c. Teor de Matéria Volátil

A matéria volátil propriamente dita não inclui a umidade livre e é composta pela água derivada da decomposição química do carvão e pela complexa mistura de gases combustíveis liberados durante o aquecimento. Santos (2008) sugere o teor de matéria volátil como sendo o responsável pela estabilidade da chama e pela velocidade da combustão, pois dele decorre o aumento da permeabilidade e a diminuição da reatividade do carvão em alto-forno.

d. Teor de Carbono Fixo

O carbono fixo, por sua vez, é o combustível residual da liberação do material volátil e resume-se, principalmente, a carbono, embora se possam observar alguns elementos voláteis não liberados (O_2 , H_2 , N_2 , S). Ao analisar a aplicação na siderurgia, conclui-se que o carvão com maiores percentuais de carbono fixo proporciona maior produtividade nos altos-fornos para a mesma carga de carvão vegetal. Por outro lado, índices muito elevados de carbono fixo causam maior degradação térmica, reduzindo, conseqüentemente, o rendimento em carvão vegetal, além da diminuição da resistência mecânica do material combustível (SANTOS, 2008).

2.2.3.3. Constituição Química

O carvão vegetal é um material orgânico com elevado teor de carbono, concentrado por efeito da degradação térmica da madeira. Sua composição química reflete o valor energético da madeira. Dependendo da temperatura final de carbonização, o carvão pode apresentar diferentes composições, variando as concentrações de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio.

Os poros correspondem a, aproximadamente, 75% do volume total do carvão vegetal. Isso ocorre devido à eliminação da água e compostos voláteis contidos na madeira, restando elucidada a baixa densidade (0,3-0,4 kg/dm³) inerente ao carvão vegetal (BENITES *et al.*, 2009).

2.2.4. Carvão Vegetal e Indústria Siderúrgica

Para obtenção de ferro metálico, remove-se o oxigênio presente nos minérios de ferro, em geral, combinando-o com o carbono. A oxirredução do minério de ferro, tendo como agente redutor o carbono, produz uma liga metálica chamada ferro-gusa. A hematita (Fe₂O₃) é o principal minério de ferro empregado na indústria siderúrgica brasileira. Além dela, são utilizadas a magnetita (Fe₃O₄), a ilmenita (Fe₂TiO₃) e a limonita (FeO(OH)_nH₂O – óxido de ferro hidratado) (VITAL; PINTO, 2009; BARCELLOS; COUTO, 2006).

Tomando a hematita como exemplo, observam-se as seguintes reações químicas quando ocorre sua combustão na presença do carbono:



Os diferentes tipos de ferro-gusa são representados por Fe₃O₄, FeO e Fe. Ademais, nota-se que a primeira e a terceira reação libera calor, enquanto a segunda o absorve. Araújo (1997) indica que a composição dessa liga metálica consiste em 90 a 95% de ferro e 3,0 a 4,5% de carbono e alguns elementos de liga.

O alto-forno é um reator do tipo chaminé utilizado na produção de ferro-gusa no estado líquido a uma temperatura de 1.500 °C, aproximadamente. Os altos-fornos modernos são construídos com cerca de 30 metros de altura, neles a carga sólida descendente, ferro-gusa e escória, é acumulada em cadinhos de 8 metros ou mais de diâmetro e os gases redutores ascendentes são liberados (MOREIRA, 2012; OLIVEIRA, 2010).

Na aciaria, para obtenção do aço, liga metálica com teor de carbono inferior a 1,8%, a partir do ferro-gusa, é preciso extrair parte do carbono presente no silício, no manganês e a totalidade do fósforo e impurezas. Para tanto, utiliza-se oxigênio puro ou o presente no ar em diferentes métodos de conversão, como os processos Linz & Donawitz e Thomas, respectivamente, ou ainda, por meio de Fornos Elétricos a Arco (FEA) do inglês, “Electric Arc Furnace” (EAF).

As usinas integradas e as semi-integradas são as principais rotas presentes na indústria siderúrgica. Resumidamente, nas usinas integradas, a transformação do minério de ferro e do aço ocorre em uma mesma unidade industrial, nela constam as seguintes etapas: 1) redução do minério de ferro para obtenção do ferro-gusa; 2) refino do ferro-gusa para a produção e resfriamento do aço; 3) transformação mecânica do aço para comercialização. Já as usinas semi-integradas, também chamadas de *minimills*, não contam com a etapa de redução, sendo as aciarias alimentadas por sucata ferrosa, ferro-gusa ou pré-reduzidos, como o ferro diretamente reduzido e ferro briquetado a quente (CGEE, 2010; CGEE, 2008).

A indústria siderúrgica brasileira possui uma peculiaridade, pois os altos-fornos a carvão vegetal representam menos de 1% da produção mundial de ferro-gusa e 25 a 30% da nacional. A utilização de carvão vegetal no processo siderúrgico deu vida ao termo “siderurgia verde” (SÁLVIO; MEDINA, 2008). Segundo Frederico (2009), por apresentar menos impurezas que o coque, o carvão vegetal contribui para a produção de um ferro-gusa, embora mais resistente, menos quebradiço e mais maleável para o forjamento. Essa nova realidade brasileira levantou, entre outras, importantes questões sobre a qualidade do carvão vegetal a ser utilizado e o desmatamento provocado por essa opção de insumo.

Sálvio e Medina (2008) prelecionam que uma das alternativas para o combate ao desmatamento seria o investimento na silvicultura, porém os ciclos de corte e os altos investimentos demandados tornam essa prática inviável para usinas que produzem apenas ferro-gusa. O carvão vegetal responde por, aproximadamente, 50 a 60% dos custos totais na

produção de ferro-gusa. Acima desse limite, sua produção torna-se economicamente inviável (BARCELLOS; COUTO, 2006).

De qualquer forma, o principal fator envolvido no desmatamento de matas nativas é a falta de responsabilidade ambiental por parte das empresas siderúrgicas que, muitas vezes, recaí sobre precárias carbonizadoras. O ideal, portanto, seria uma responsabilidade compartilhada, pois se evitaria, dessa forma, isentar as empresas guseiras de responder judicialmente pelo carvão vegetal que consomem (SÁLVIO; MEDINA, 2008).

Quanto à qualidade, segundo Santos (2008), espera-se que o carvão vegetal possua entre 75 e 80% de teor de carbono fixo, menos de 1% de teor de cinzas e, conseqüentemente, entre 20 e 25% de teor de matéria volátil. Com granulometria de 9 mm a 100 mm e densidade aparente não inferior a 0,3 g/cm³, a umidade máxima do carvão deve girar em torno de 6%, o nível de enxofre entre 0,03 e 0,10% e, finalmente, a resistência à compressão não pode ser inferior a 10 kg/cm² e nem superior a 80 kg/cm².

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Espécies Analisadas

Utilizaram-se oito espécies de madeira, entre elas, sete nativas do cerrado e uma exótica, *Eucalyptus* sp. As espécies nativas, por sua vez, foram representadas por: *Pterodon pubescens*; *Copaifera langsdorffii*; *Sclerolobium paniculatum*; *Qualea grandiflora*; *Vochysia ferruginea*; *Caryocar brasiliense*; e *Pisonia* sp. Foi analisado, ainda, carvão composto por mistura de diferentes espécies nativas do cerrado.

3.2. Coleta do Material

As sete espécies nativas do cerrado e a exótica *Eucalyptus* sp. foram abatidas na Fazenda Água Limpa (FAL), pertencente à Universidade de Brasília (UnB). As cunhas de madeira obtidas foram encaminhadas ao Laboratório de Produtos Florestais (LPF), setor de Anatomia e Morfologia de Madeiras, do Serviço Florestal Brasileiro – SFB, onde foram identificadas por comparação na Xiloteca Dr. Harry van der Slooten do SFB, cadastrada no índice Xylariorum, da Associação Internacional dos Anatomistas de Madeira.

Com 42,36 km², a Fazenda Água Limpa delimita-se pelas coordenadas 15°58'32,7" – 15°58'56,84"S e 47°59'02,23" – 47°53'16,15"W, a 1.100 m de altitude, na região do Distrito Federal (LACERDA *et al.*, 2007). O clima da região é do tipo Aw, classificação segundo Köppen, com temperatura máxima de 28,5 °C e mínima de 12 °C. A umidade relativa do ar entre maio e setembro fica abaixo de 70%, com mínima ocorrendo em agosto, e média de 47%, podendo cair para 15% nos períodos mais secos. A precipitação média anual é de 1.600 mm, com pronunciada estação seca de junho a setembro (MORAIS, 2009).

A vegetação predominante é o cerrado sentido restrito, que ocupa 1.480 ha, mas existem, também, outras fitofisionomias, variando de campo limpo até matas de galeria. O solo predominante é o Latossolo Vermelho Amarelo, pobre em nutrientes e com alto teor de alumínio (LACERDA *et al.*, 2007).

A Fazenda Bom Sucesso, pertencente à Companhia Votorantim Siderurgia (VS), do grupo Votorantim, forneceu carvão de *Eucalyptus* sp. e carvão composto por mistura de diferentes espécies nativas do cerrado produzidos para fins acadêmicos em sua Unidade Florestal. A unidade localiza-se no município de Vazante, região nordeste do estado de Minas Gerais. A área se situa a 17°36'09" de latitude Sul, 46°42'42" de longitude a Oeste de Greenwich e altitude de 550 metros. Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo Aw, tropical úmido de savana, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual é de 24°C e a precipitação média anual é de 1.450 mm (TRUGILHO *et al.*, 2007).

A Votorantim Siderurgia forneceu o carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. e de madeira do cerrado da região de Vazante. O material foi carbonizado sob condições industriais em forno RAC 220 (R = Retangular, AC = Acesita, 220 m³ de capacidade), esse modelo de forno é construído de tijolos de alvenaria e possui, em suas extremidades, portas de aço com materiais refratários para reduzir as perdas de calor (Figura 2). O tempo de carbonização foi de, aproximadamente, sete dias e a temperatura máxima alcançada foi 300 °C (Figura 3).



Figura 2: Forno RAC 220 da Votorantim Siderurgia.

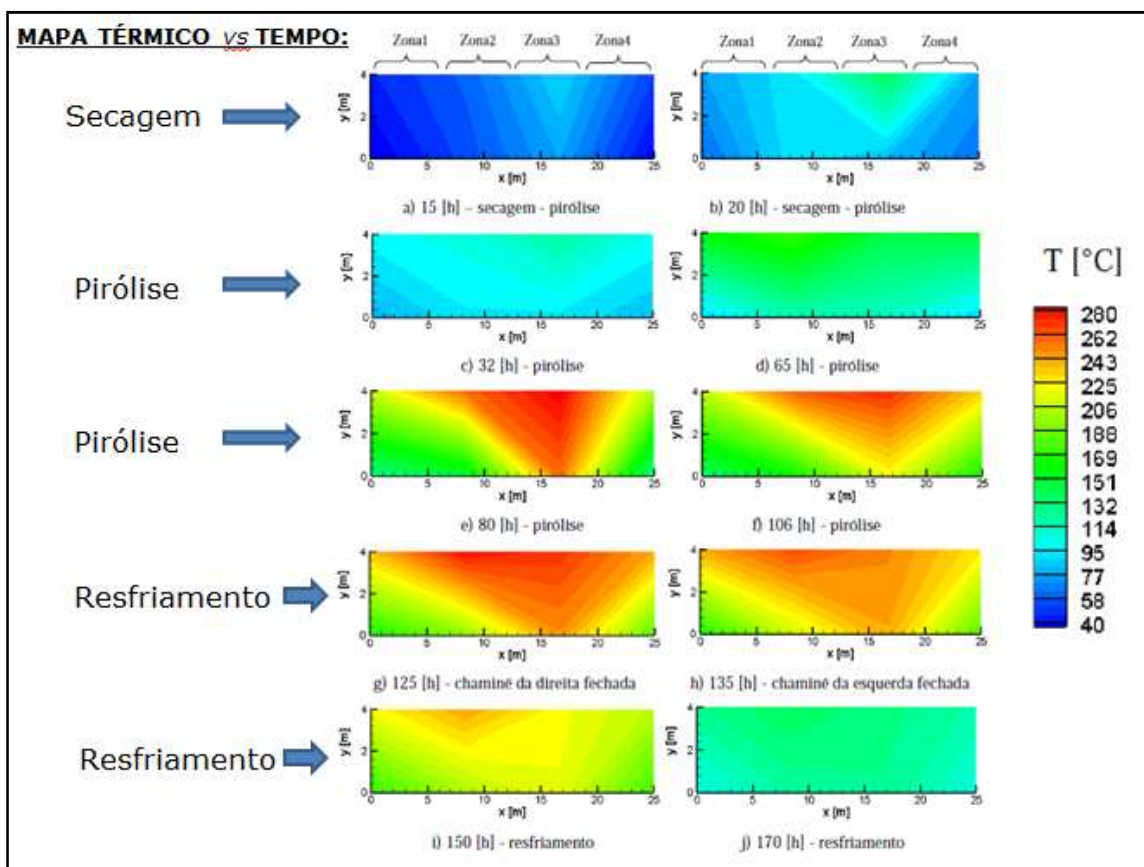


Figura 3: Ilustração do perfil térmico obtido por instrumentação em fornos RAC 220 da Votorantim Siderurgia (CARVALHO, S. R., 2012, *apud* MELIDO, R. C. N., 2012).

3.3. Obtenção das Amostras

O carvão de eucalipto e de espécies do cerrado da Fazenda Água Limpa foi produzido em laboratório a partir da madeira moída. A madeira fragmentada e seca em estufa com circulação e renovação de ar Marconi (MA 035) por quatro horas a 105 ± 2 °C foi moída no

moinho de facas de laboratório da marca Marconi, modelo MA 680 (Figura 4). Armazenou-se o material moído e separado por espécie na Fazenda Água Limpa em sacos plásticos esterilizados.



Figura 4: A – Moinho de facas Marconi (MA 680); B – Estufa Marconi (MA 035).

A madeira moída foi carbonizado a 500 °C, por cinco horas, em mufla, marca Quimis, modelo Q.313.24 (Figura 5). Em seguida, moeram-se, individualmente, as amostras de carvão fornecidas pela Votorantim no mesmo moinho utilizado para a madeira. O material carbonizado foi armazenado individualmente em sacos plásticos esterilizados e, logo depois, classificado e destinado aos testes de análise imediata e de determinação do poder calorífico.



Figura 5: Mufla Quimis (Q.313.24).

Ressalta-se que se higienizaram todos os equipamentos utilizados a cada etapa do processo de geração de carvão para não haver contaminação das amostras.

3.4. Caracterização dos Carvões

Consideraram-se três repetições para os quatro tratamentos (T) para a caracterização dos carvões: T1) carvão de mistura de espécies nativas do cerrado coletadas na Fazenda Água Limpa; T2) carvão de mistura de espécies nativas do cerrado fornecido pela Votorantim; T3) carvão de *Eucalyptus* sp. coletado na Fazenda Água Limpa; T4) carvão de *Eucalyptus* sp. fornecido pela Votorantim. Não houve proporção quanto à mistura dos carvões de espécies nativas do cerrado.

Os carvões, moídos, foram classificados em peneiras de 40 ABNT/ASTM – 35 MESH/TYLER (abertura de 0,425 mm) para separar o material de granulometria mais grossa e de 60 ABNT/ASTM – 60 MESH/TYLER (abertura de 0,250 mm) para obtenção de partículas menores. Utilizou-se o Agitador de Peneiras para Análise Granulométrica da marca Bertel (Figura 6) regulado para o tempo de agitação de dez minutos em potência vibracional máxima.



Figura 6: Agitador de Peneiras para Análise Granulométrica Bertel.

3.4.1. Análise Imediata

Seguiu-se a norma NBR 8.112/1986, com adaptações, que prescreve o método para a análise imediata de carvão vegetal.

3.4.1.1. Teor de Cinzas

Para a determinação do teor de cinzas, cumpriu-se o seguinte roteiro presente na norma NBR 8.112/1986:

O carvão vegetal, classificado em peneiras de 40 ABNT/ASTM, foi colocado em placas de Petri e seco em estufa da marca Marconi (MA 035) a 105 ± 2 °C até atingir massa constante. Com a balança analítica Bel (UMARK 210A classe I), pesou-se 1,0 grama de amostra de carvão, anotando-se a massa “m”, isenta de umidade e com granulometria inferior a 0,425 mm. Simultaneamente, os cadinhos foram deixados na mufla por tempo suficiente para sua calcinação e, logo depois, acondicionados em dessecador para resfriamento. Utilizaram-se dois cadinhos por repetição em cada tratamento, totalizando vinte e quatro amostras.

Posteriormente, os cadinhos foram tarados “m₀” e acrescidos de 1,0 grama do material seco. Colocaram-se os cadinhos com as amostras de material carbonizado na mufla (Figura 7), previamente aquecida a 700 ± 10 °C, até que o carvão se queimasse completamente. Finalmente, após retirar os cadinhos da mufla e resfriá-los em dessecador, aferiram-se as massas finais “m₁”.



Figura 7: Mufla Quimis (Q.318.24) com os cadinhos contendo as amostras para análise do teor de cinzas.

O teor de cinza do carvão foi calculado de acordo com a Equação 1:

$$CZ = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad \text{Equação 1 (NBR 8.112/96)}$$

Onde:

CZ = teor de cinzas, em %;

m_0 = massa do cadinho, em g;

m_1 = massa do cadinho + resíduo, em g;

m = massa da amostra, em g;

Para serem considerados, os resultados obtidos em duplicata na determinação dos teores de cinza não diferiram um do outro mais que 10% em valores relativos.

3.4.1.2. Teor de Matérias Voláteis

Seguindo a norma NBR 8.112/1986, o carvão vegetal, classificado em peneiras entre 40 e 60 ABNT/ASTM, foi colocado em placas de Petri e seco em estufa a 105 ± 2 °C até atingir massa constante. Com a balança analítica, pesou-se 1,0 grama de amostra de carvão, anotando-se a massa “m”, isenta de umidade e com granulometria inferior a 0,425 mm e superior a 0,250 mm. Simultaneamente, os cadinhos, com as tampas, foram deixados na mufla por tempo suficiente para sua calcinação e, logo depois, acondicionados em dessecador para resfriamento. Utilizaram-se dois cadinhos por repetição em cada tratamento, totalizando vinte e quatro amostras.

Os cadinhos, após serem tarados e acrescidos de 1,0 grama do material seco “ m_1 ”, foram postados, por três minutos, sobre a porta da mufla, previamente aquecida a 900 ± 10 °C e, posteriormente, colocados no interior da mufla por sete minutos, com a porta fechada (Figura 8).

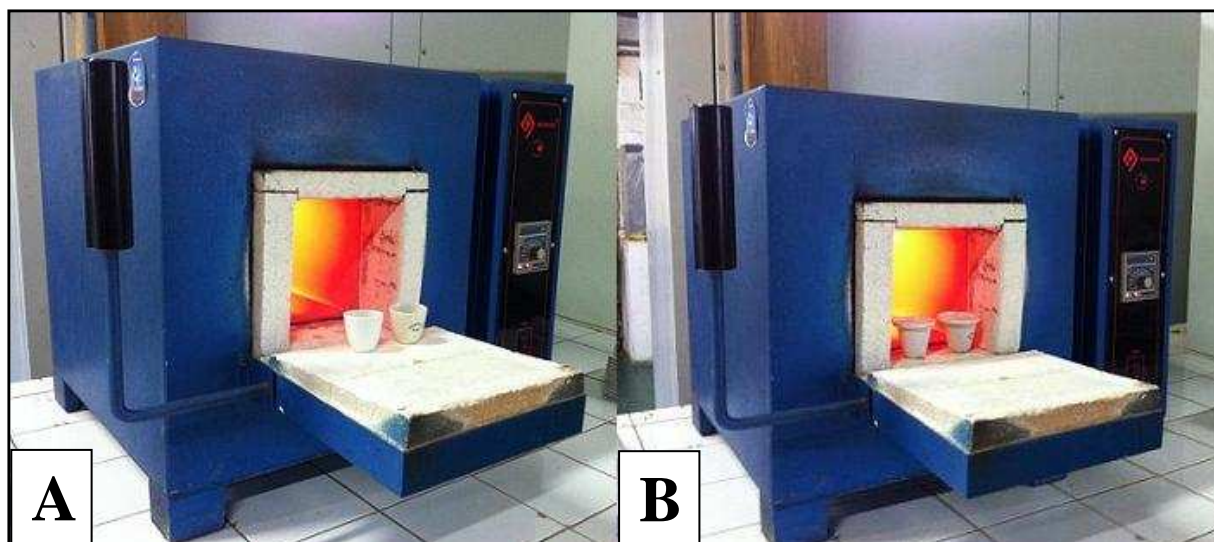


Figura 8: Análise do teor de matéria volátil. A – Cadinhos, sem tampa, na porta da Mufla Quimis (Q.318.24); B – Cadinhos, com tampa, no interior da Mufla Quimis (Q.318.24).

Por fim, retiraram-se os cadinhos da mufla e, após resfriamento em dessecador, aferiram-se as massas finais “ m_0 ”.

Calculou-se o teor de matérias voláteis de acordo com a Equação 2:

$$MV = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad \text{Equação 2 (NBR 8.112/96)}$$

Onde:

MV = teor de matérias voláteis, em %;

m_1 = massa inicial do cadinho + amostra, em g;

m_0 = massa final do cadinho + amostra, em g;

m = massa da amostra, em g.

Para serem considerados, os resultados obtidos em duplicata na determinação dos teores de matérias voláteis não diferiram um do outro mais que 2% em valores relativos.

3.4.1.3. Teor de Carbono Fixo

Obteve-se o teor de carbono fixo por uma medida indireta, calculada de acordo com a Equação 3:

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad \text{Equação 3 (NBR 8.112/96)}$$

Onde:

CF = teor de carbono fixo, em %;

CZ = teor de cinza, em %;

MV = teor de matérias voláteis, em %.

3.4.2. Poder Calorífico

O poder calorífico superior foi determinado segundo a norma NBR 8.633/1984.

O carvão vegetal, classificado em peneiras de 60 ABNT/ASTM, foi colocado em pratos de alumínio e seco em estufa a $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingir massa constante. Finalizada essa etapa, acondicionou-se o material em dessecador para, posteriormente, pesar duas amostras de, aproximadamente, 0,4500g por repetição em cada tratamento, totalizando vinte e quatro análises (Figura 9).

Findo esta preparação, cada amostra foi conduzida à bomba calorimétrica para obtenção do poder calorífico superior (Figura 10).



Figura 9: A – Estufa Fanem (315 SE) com as amostras em pratos de alumínio; B – Amostras acondicionadas em dessecador; C – Balança Bel (UMARK 210 Classe I).



Figura 10: Bomba calorimétrica IKA (C2000 Basic) acoplado a aparelho para banho de refrigeração IKA (KV 600 Digital).

Para serem considerados, os resultados obtidos em duplicata na determinação do poder calorífico superior não diferiram um do outro mais que 30 kcal/kg.

3.4.3. Análise Estatística

Com o auxílio do Software Microsoft Excel 2007, obteve-se o coeficiente de variação dos resultados da análise imediata e do poder calorífico superior de cada tratamento para atestar a regularidade da condução do experimento. Ademais, com o software IBM SPSS Statistics, versão 20, fez-se o teste de Tukey para observação de diferenças significativas das médias encontradas entre os processos produtivos, em laboratório e em forno industrial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Imediata

4.1.1. Teor de Material Volátil

Os valores apresentados na Tabela 2 se referem ao teor médio de materiais voláteis encontrados nos diferentes tratamentos. Os coeficientes de variação apresentados sugerem que o experimento foi bem conduzido. Apesar de o tratamento 1 ter registrado coeficiente de

variação elevado, o coeficiente de variação experimental foi de 4,63% para o teste de material volátil.

Tabela 2 – Teor de matéria volátil dos diferentes tratamentos.

Material Carbonizado	Teor de Matéria Volátil (%)	Coefficiente de Variação (%)
T1	11,7360 a	11,81
T2	13,3803 a	1,43
T3	27,5740 b	3,16
T4	25,9930 b	2,15

Obs.: as médias seguidas da mesma letra são iguais estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Observou-se que os teores de matéria volátil entre os tratamentos produzidos em laboratório, na Fazenda Água Limpa (FAL), não variaram significativamente entre si, assim como aqueles produzidos industrialmente, na Votorantim. Houve discrepância, entretanto, entre os diferentes processos produtivos em decorrência da temperatura de carbonização utilizada em cada caso e da maior dificuldade de controle da mesma na produção industrial.

O carvão produzido na FAL, tanto de eucalipto como de espécies nativas do cerrado, registrou níveis de matéria volátil abaixo do encontrado em diferentes estudos. Assis *et al.* (2012), trabalhando com carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* produzido a 450 °C, com quatro horas de tempo de carbonização, observaram uma variação de 18,5 a 20,3% no teor de matéria volátil dos indivíduos. Vale *et al.* (2002b), por seu turno, carbonizando a madeira de *Eucalyptus grandis* a 500 e 400 °C, por três horas e meia, registraram teores de matéria volátil próximos a 22,5 e 30,34%, respectivamente.

Protásio *et al.* (2011), em seu estudo, encontraram teor de matéria volátil médio de 21,2% para a *Qualea parviflora*. Vale e Nogueira (2001), analisando nove espécies nativas do cerrado, notaram que o teor de matéria volátil das espécies variou de 21,5 a 27,6%.

Assim, percebeu-se que os valores encontrados para o carvão proveniente da Votorantim estão em consonância com os demais estudos. Aquele produzido na FAL, no entanto, teve seu valor reduzido, possivelmente, em decorrência do controle da temperatura e

do processo produtivo, pois a carbonização se deu a 500 °C por, aproximadamente, cinco horas.

Santos (2008) alerta que para ser utilizado na siderurgia, o carvão deve possuir entre 20 e 25% de teor de matéria volátil, pois quanto maior o nível de materiais voláteis menor é o percentual de carbono fixo, o que compromete o desempenho do carvão no alto-forno. Portanto, quanto à matéria volátil, apenas o carvão de *Eucalyptus* sp. produzido na Votorantim Siderurgia se aproximou a um nível satisfatório para o uso siderúrgico.

4.1.2. Teor de Cinzas

Na tabela 3, encontra-se o teor médio de cinzas obtido para os diferentes tratamentos. Os coeficientes de variação apresentados sugerem que o experimento foi regularmente conduzido. Apesar de os tratamentos 1 e 2 terem registrado coeficientes de variação elevados, o coeficiente de variação experimental foi de 9,43% para a análise do teor de cinzas.

Tabela 3 – Teor de cinzas dos diferentes tratamentos.

Material Carbonizado	Teor de Cinzas (%)	Coefficiente de Variação (%)
T1	1,7988 a	16,72
T2	0,2958 b	13,96
T3	2,0860 a	4,23
T4	0,8514 c	2,81

Obs.: as médias seguidas da mesma letra são iguais estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Diferentemente do teor de matéria volátil, obteve-se diferença significativa para o nível de cinza entre os tratamentos dentro de cada processo produtivo. Ademais, o carvão de espécies nativas do cerrado produzido na FAL apresentou mesmo teor de cinzas a 5% de significância que aquele produzido na Votorantim.

Reforçando os resultados encontrados para a mistura de espécies do cerrado, cita-se Vale *et al.* (2001) que, ao analisarem a qualidade do carvão vegetal de indivíduos nativos do cerrado, registraram a variação de 0,33 a 2,93% no teor de cinzas das doze espécies estudadas.

Barcellos *et al.* (2005), trabalhando com cinco espécies de eucalipto, observaram teores de cinza variando de 0,5 a 1,6%. Vale *et al.* (2002b), contudo, encontraram valores iguais a 0,34%, 0,37% e 0,35% para o *Eucalyptus grandis* carbonizado a 300 °C, 400 °C e 500 °C, respectivamente. Nota-se que a diferença encontrada entre os níveis de cinza do eucalipto produzido na FAL e aquele produzido na Votorantim pode ser atribuída à espécie à qual pertencem, pois, a temperaturas comerciais, entre 400 e 500 °C, há pouca variação no teor de cinzas.

Para evitar a corrosão dos equipamentos metálicos e a segregação no processo produtivo do ferro-gusa, Santos (2008) sugere teores de cinza inferiores a 1% para a utilização siderúrgica do carvão. Deduz-se, por conseguinte, que o carvão de espécies nativas do cerrado é prejudicial para os altos-fornos e para a produção do ferro-gusa.

4.1.3. Teor de Carbono Fixo

A tabela 4 apresenta o teor de carbono fixo encontrado para cada tratamento a partir dos resultados obtidos para o teor de cinzas e o teor de matéria volátil. Os coeficientes de variação registrados sugerem que o experimento foi bem conduzido. O coeficiente de variação experimental foi de 1,02% para a análise do teor de carbono fixo.

Tabela 4 – Teor de carbono fixo dos diferentes tratamentos.

Material Carbonizado	Teor de Carbono Fixo (%)	Coefficiente de Variação (%)
T1	86,4652 a	1,95
T2	86,3239 a	0,18
T3	70,3400 b	1,22
T4	73,1556 c	0,76

Obs.: as médias seguidas da mesma letra são iguais estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

A despeito de terem registrado níveis de cinza estatisticamente diferentes, o material carbonizado na FAL, não apresentou diferença significativa quanto ao teor de carbono fixo, diferentemente daquele produzido pela Votorantim Siderurgia. Ademais, percebe-se que o

carvão produzido em laboratório, em virtude do seu baixo teor de materiais voláteis, alcançou níveis de carbono fixo superiores àqueles produzidos industrialmente.

Encontra-se na literatura uma variação de 69 a 77% nos valores de teor de carbono fixo para espécies nativas do cerrado carbonizadas a, aproximadamente, 450 °C (Vale *et al.*, 2001; VALE; NOGUEIRA, 2001; VALE *et al.*, 1996). Quanto ao carvão de *Eucalyptus* sp., nota-se, em vários estudos, valores de 72 a 82% para o teor de carbono fixo (ASSIS *et al.*, 2012; REIS *et al.*, 2012; BOTREL *et al.*, 2007; VALE *et al.*, 2002b). Santos (2008) relata que o carvão vegetal deve apresentar teores de carbono fixo variando de 75 a 80% para sua utilização na siderurgia.

Os resultados obtidos a partir da análise do carvão da empresa Votorantim Siderurgia, portanto, corroboram com o que a literatura preceitua, sugerindo o maior controle da temperatura e o tempo de carbonização na produção do carvão em laboratório como sendo um dos responsáveis pelos altos valores encontrados. Atenta-se, contudo, para o fato de que todos os tratamentos apresentaram níveis indesejáveis de teor de carbono fixo para o uso em usinas siderúrgicas. O carvão produzido em laboratório registrou níveis superiores aos almejados, e o produzido industrialmente, inferiores, em ambos os casos, tanto para a mistura de espécies nativas do cerrado como para *Eucalyptus* sp.

4.2. Poder Calorífico Superior (PCS)

Os valores apresentados na Tabela 5 correspondem ao poder calorífico superior encontrado para os quatro tratamentos. Os coeficientes de variação observados sugerem que o experimento foi bem conduzido. O coeficiente de variação experimental foi de 0,57% para o teste de poder calorífico superior.

Tabela 5 – Poder calorífico superior dos diferentes tratamentos.

Material Carbonizado	Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	Coefficiente de Variação (%)
T1	7697 a	0,62
T2	7799 a	0,14
T3	6509 b	0,52
T4	7147 c	1,00

Obs.: as médias seguidas da mesma letra são iguais estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Nota-se que o material produzido na FAL não apresentou diferença significativa quanto ao poder calorífico superior, diferentemente daquele produzido pela Votorantim Siderurgia. Reiterando a correlação positiva entre o PCS e o teor de carbono fixo, a significância a 5% dos diferentes poderes caloríficos superiores encontrados repetiu aquela observada para o percentual de carbono fixo (Tabela 6).

Tabela 6 – Poder calorífico superior, teor de carbono fixo, teor de cinzas e teor de material volátil dos diferentes tratamentos.

Material Carbonizado	PCS (kcal/kg)	TCF (%)	TCZ (%)	TMV (%)
T1	7697 a	86,4652 a	1,7988 a	11,7360 a
T2	7799 a	86,3239 a	0,2958 b	13,3803 a
T3	6509 b	70,3400 b	2,0860 a	27,5740 b
T4	7147 c	73,1556 c	0,8514 c	25,9930 b

Obs.: dentro de cada análise, as médias seguidas da mesma letra são iguais estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Com relação ao eucalipto, Reis *et al.* (2012) encontraram valores médios de PCS iguais a 7.086 kcal/kg para o *Eucalyptus urophylla* carbonizado a 450 °C por cinco horas. Assis *et al.*, estudando um clone híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, observaram uma média de 7.543 kcal/kg de PCS para os tratamentos carbonizados a 450 °C por quatro horas. Utilizando o tempo de carbonização de três horas e meia, Vale *et al.* (2002b), ao analisarem a relação da temperatura e o poder calorífico superior de *E. grandis*, apontaram valores da ordem de 7.261 e 7.604 kcal/kg para o carvão produzido a 400 e 500 °C, respectivamente.

Castro (2011) obteve variações de 7.332 a 7.478 kcal/kg; 7.279 kcal/kg a 7.383 kcal/kg; 7.282 kcal/kg a 7.363 kcal/kg para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente, cujas madeiras foram carbonizadas a 450 °C por cinco horas.

Enquanto o PCS do carvão de *Eucalyptus* sp. produzido na FAL é superior aos valores enunciados pelos autores citados, o gerado pela Votorantim está ligeiramente abaixo. Para a queima direta, propósito das siderúrgicas, aconselha-se utilizar carvões com maior poder calorífico, atentando-se para as demais características do material, pois há significativo decréscimo no consumo de carvão para efeito de redução dos minérios na produção de ferro-gusa (FREDERICO, 2009).

Vale *et al.* (2001), ao analisarem a qualidade do carvão vegetal de indivíduos nativos do cerrado, observaram a variação de 7.047 a 7.641 kcal/kg quanto ao PCS de doze espécies estudadas. Protásio *et al.* (2011), em seu estudo, encontraram PCS médio de 7.259 kcal/kg para a *Qualea parviflora*. Diante do exposto, deduz-se que o PCS do carvão obtido da mistura de espécies do cerrado produzido na FAL está em consonância com as pesquisas abordadas. Os valores encontrados para o carvão de cerrado produzido na Votorantim, em contrapartida, estão abaixo do esperado. Esse fato pode ser atribuído a baixas temperaturas de carbonização ou ao controle precário da temperatura. A utilização desse material na siderurgia pode gerar desvantagens econômicas no processo produtivo em virtude do consumo excessivo de carvão para redução do minério de ferro.

Como observado, o uso de carvão de espécies nativas do cerrado, além de oferecer risco para a vida útil do equipamento e para a qualidade do produto, em decorrência do elevado teor de cinzas gerado, exige maior volume de carvão para redução de minérios. A produção de carvão em escalas industriais torna difícil a tarefa de controle da temperatura de carbonização, o que gera carvões com menor qualidade para fins energéticos que aqueles produzidos em laboratório.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos a partir do material fornecido pela Votorantim Siderurgia, classifica-se o carvão de *Eucalyptus* sp. como de melhor qualidade para o uso siderúrgico do que aquele produzido com espécies do cerrado.

Ademais, supõe-se que as diferenças observadas na qualidade do carvão em virtude dos distintos meios de carbonização decorram da temperatura utilizada, da impossibilidade de se controlá-la nos fornos industriais de maneira perfeita e do tempo de carbonização.

Por fim, para o carvão produzido em laboratório, a única diferença entre os tratamentos, significativa a 5%, deu-se no teor de cinzas. Nos testes realizados nas amostras de carvão produzidas em forno industrial, no entanto, somente o teste de teor de matéria volátil, a 5% de significância, foi considerado igual.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: carvão vegetal: análise imediata: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1986. 5 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633: carvão vegetal: determinação do poder calorífico: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2012: ano base 2011.** Brasília, 2012. 145 p.

ABREU, L. D.; MARINO, R. H.; MESQUITA, J. B.; RIBEIRO, G. T. **Degradação da madeira de *Eucalyptus* sp. por Basidiomicetos de podridão branca.** Arq. Inst. Biol. v.74, n.4, p.321-328, 2007.

ALMEIDA, S. P.; SILVA, J. A. **Piqui e buriti: importância alimentar para a população dos cerrados.** Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1994. 38 p. (Documentos, 54).

ARAÚJO, H. J. B. **Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do Projeto de Colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002. 184 p.

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia.** Arte & Ciência, v. 1, 1997. 470 p.

ASSIS, M. R. de; PROTÁSIO, T. de P.; ASSIS, C. O. de; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. **Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.** Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MÜLLER, M. D.; COUTO, L. **O estado da arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais.** Biomassa & Energia, Viçosa, v. 2, n. 1, p. 141-158, 2005.

BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. **Siderurgia a carvão vegetal: passado, presente e futuro.** Informativo Técnico RENABIO, Viçosa, n. 1, p. 1-15, 2006.

BENITES, V. de M.; TEIXEIRA, W. G.; REZENDE, M. E.; PIMENTA, A. S. **Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: aprendendo com as Terras Pretas de Índio.** In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. (Ed.). As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, p. 285-296. 2009.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. da S.; SILVA, J. R. M. da. **Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*.** Revista Árvore, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2012: ano base 2011.** EPE, Rio de Janeiro 2012. Disponível em: < [https://ben.epe.gov.br/BEMResultados Preliminares2012.aspx](https://ben.epe.gov.br/BEMResultadosPreliminares2012.aspx)>. Acesso em: 27.09.2012.

BRITO, J. O. **Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais.** Revista de Estudos Avançados, v.4, n.9, p.221-227, 1999.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia.** Série Técnica. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Departamento de Silvicultura da ESALQ – USP, v. 2, nº 5, p. 1-25. Piracicaba, 1981.

BRITO, J. O.; NUCCI, O. **Estudo tecnológico da madeira de *Pinus* spp. para a produção de carvão vegetal e briquetagem.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPEF, n. 26, p. 25-30, São Paulo, 1984.

CASTILHO, E.; ALZOLA, A. **Utilizacion de biomasa: determinacion del poder calorifico de los conos de tres especies florestales cubanas.** Revista Florestal Baracoa, v.18, n. 2, p. 117-120, 1988.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. na madeira e carvão vegetal.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. 97 p.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: NT Fundentes e Escorificantes – situação atual com tendências (2025).** Brasília, 2008. 26 p.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Siderurgia no Brasil 2010-2025; subsídios para tomada de decisão.** Brasília, 2010. 112 p.

COELHO, S. T. **Carvão vegetal. Aspectos técnicos, sociais, ambientais e econômicos.** Nota técnica. CENBIO. 48 p. 2008.

CORRÊA, R. S.; MÉLO FILHO, B. **Levantamento florístico do estrato lenhoso das áreas mineradas no Distrito Federal.** Revista *Árvore*, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1099-1108, nov./dez. 2007.

CUNHA, M. P. S. C.; PONTES, C. L. F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z. B.; BARBOSA, A. P. R. **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras.** In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.

DUBOC, E.; COSTA, C. J.; VELOSO, R. F.; OLIVEIRA, L. S.; PALUDO, A. **Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 37 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **EMBRAPA Florestas – Sistemas de produção.** Versão Eletrônica, n. 4, Ago./2003. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/02_indicacao_de_especies.htm>. Acesso em: 18.07.2011.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **State of the world's forests 2007.** Rome: FAO, 2007. 144 p.

FERREIRA, R. A.; DAVIDE, A. C.; TONETTI, O. A. O. **Morfologia de sementes e plântulas de pau-terra (*Qualea grandiflora* - Vochysiaceae).** Revista Brasileira de Sementes, v.23, n.1, p.116-122, 2001.

FRANÇA, F. 2010. *Vochysiaceae in Lista de Espécies da Flora do Brasil*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/2010/FB021583>>. Acesso em: 10.08.2012.

FREDERICO, P. G. U. **Influência da densidade e composição química da madeira sobre a qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus* S. T. Blake**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2009. 75 p.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. 195 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade de Brasília – UnB. Brasília – DF, 2008.

GOMES, P. A; OLIVEIRA, J. B. **Teoria da carbonização da madeira**. In: PENEDO, W. R. (Comp.). *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte: CETEC, 1980. 158 p. (Série Publicações Técnicas, n. 1).

HARIDASAN, M.. **Alumínio é um elemento tóxico para as plantas nativas do cerrado?** In: Prado, CHBA; Casali, CA. *Fisiologia Vegetal: práticas em relações hídricas, fotossíntese e nutrição mineral*. Barueri, Ed. Manole, 2008. 10p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e silvicultura 2005**. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Agropecuária, 2006. v. 20. 47 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela 4 - Quantidade e valor dos produtos da silvicultura, por produto, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação - 2010**. Disponível em: < http://www.ibge.gov.br/english/estatistica/economia/pevs/2010/tabelas_pdf/tab04.pdf>. Acesso em: 27.09.2012.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS do Estado de São Paulo. **A madeira como combustível**; publicação 65, Boletim nº17, 1937.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797).

JUVILLAR, J. B. **Tecnologias da transformação da madeira em carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1980.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. Curitiba: UFPR, 2005. 3. ed. 87 p.

LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O.; CAMPOS, P. M.; PARA, R. A. **Utilização de sensoriamento remoto para o estabelecimento de relações entre vegetação nativa e classes de solos em mapeamento pedológico, Distrito Federal**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Florianópolis – SC, p. 3991-3996, 2007.

LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. Vol. 1. São Paulo: IPT, 1986. 342 p.

LPF – LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS. **Banco de dados de madeiras brasileiras**. Disponível em: < <http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira/caracteristicas.php?ID=271&caracteristica=282>>. Acesso em: 10.08.2012.

MELIDO, R. C. N. **Avaliação técnica e econômica de dois projetos florestais com eucalipto para fins energéticos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012. 107 p.

MORAIS, F. M. de. **Análise de atributos da vegetação e do solo em cerrado *sensu stricto*, 20 anos após distúrbios antrópicos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009. 99 p.

MOREIRA, D. L. GUARIM NETO, G. **Usos múltiplos de plantas do cerrado: um estudo etnobotânico na comunidade sítio Pindura, Rosário Oeste, Mato Grosso, Brasil**. Polibotânica, n. 27, p. 159-190, 2009.

MOREIRA, M. F. **Siderurgia**. Disponível em: <<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/siderurgia2.pdf>>. Acesso em: 20.11.2012.

OLIVEIRA, I. da R. M. de; VALE, A. T. do; MELO, J. T. de; COSTA, A. F. da; GONÇALEZ, J. C. **Biomassa e características da madeira de *Sclerolobium paniculatum* cultivado em diferentes níveis de adubação**. Cerne, Lavras, v. 14, n. 4, p. 351-357 out./dez. 2008.

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, G. M. E.; GOMES, O. P. A. **Produção de carvão vegetal, aspectos técnicos**. In: CETEC. Carvão vegetal. Belo Horizonte, p. 63-102. 1982.

OLIVEIRA, V. M. **estudo da porosidade de pelotas de minério de ferro para altos-fornos através de adsorção física**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2010. 100p.

PAIVA, H. N.; JACOVINE, L. A. G.; RIBEIRO, G. T.; TRINDADE, C. **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2001. 138p.

PAIVA, L. A.; RAO, V. S. N.; GRAMOSA, N. V.; SILVEIRA, E. R. **Gastroprotective effect of *Copaifera langsdorffi* oil-resin on experimental gastric ulcer models in rats**. Journal of Ethnopharmacology, v. 62, p. 73-78, 1998.

PAULA, J. E. de; ALVES, J. L. de H. **897 madeiras nativas do Brasil: anatomia - dendrologia - dendrometria - produção - uso**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2007. 438 p.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PINHEIRO, P. C. C. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. Belo Horizonte: CETEC, 1980.

PROTÁSIO, T. de P.; SANTANA, J. de D. P. de; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. **Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora***. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011.

PUNTES, R. S. E. S. **Expansão das florestas plantadas com fins energéticos no Brasil e sua influência nas emissões dos gases de efeito estufa – GEE: análise de dois cenários futuros**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2010. 135 p.

RAPASSI, R. M. A.; TARSITANO, M. A. A.; PEREIRA, J. C. R.; ARAÚJO, C. A. M. **Cultura do eucalipto na região de Suzanópolis, Estado de São Paulo: Análise econômica**. Inf. Econ., 38: 7-13, 2008.

REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. **O. Efeito de Local e Espaçamento na Qualidade do Carvão Vegetal de um Clone de**

Eucalyptus urophylla S. T. Blake. Floresta e Ambiente, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.055>>. Acesso em: 26.11.2012.

REIS, G. G. dos; DRUNE, A.; RENA, A. B. Estudos sobre a dormência de sementes de sucupira (*Pterodon pubescens* Benth): tratamento para superação da dormência. Revista Árvore, Viçosa, v. 9, n. 1, p. 49-57. 1985.

RIZZINI, C. T. Árvores e madeiras úteis do Brasil: manual de dendrologia brasileira. Ed. Edgar Bluncher, 1971. 294 p.

ROCCO, C. D. Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais: um estudo de caso na indústria de alimentos. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção), São Carlos, 2011, 99p.

RONDON NETO, R. M.; SANTOS, J. S.; SILVA, M. A.; KOPPE, V. C. Potencialidades de uso de espécies arbustivas e arbóreas em diferentes fisionomias de cerrado, em Lucas do Rio Verde/MT. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 10, n. 2, p. 113-126, 2010.

SÁLVIO, F. E. C.; MEDINA, H. V. Produção sustentável de aço no Brasil. In: Anais da XIV Jornada de Iniciação Científica da CETEM. MCT/CETEM, 2008.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 1., 2008, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SILVA JÚNIOR, F. G. da. Utilização múltipla da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de celulose kraft. Série Técnica do IPEF, Piracicaba, SP, v. 9, n. 27, p. 56-62. ago. 1993. Edição dos anais do Workshop “Qualidade da madeira em *Pinus*”, Piracicaba, SP, 1992.

SILVA JÚNIOR, M. C. da. 100 árvores do cerrado: guia de campo. Brasília, Ed. Rede de Sementes do Cerrado, 2005. 278 p.

SOARES, V. C. Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades. 2011. 108 p. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

THOMPSON, R. M. Estimativas de Volume, Biomassa e Carbono para o Carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vog. var. *subvelutinum* Benth.). Dissertação de Mestrado em

Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-108/09, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009. 64 p.

TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. da S.; LIMA, J. T.; PÁDUA, F. A. de; SOUZA, M. A. M. de. **Deformação residual longitudinal (DRL) e sua relação com as características de crescimento da árvore em clones de *Eucalyptus***. *Cerne*, Lavras, v. 13, n. 2, p. 130-137, 2007.

UHLIG, A. **Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para a estimação do consumo**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, 2008. 156 p.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. **O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas**. *Revista Brasileira de Energia*, v. 14, p. 67-85, 2008.

VALE, A. T. **Caracterização da biomassa lenhosa de um Cerrado *Sensu Stricto* da região de Brasília para o uso energético**. 2000. 111 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000a.

VALE, A. T. do; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. **Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado**. *Ciência Florestal*, v. 12, nº 1, p. 71-80, 2002a.

VALE, A. T. do; PIMENTEL, J. W.; DEL MENEZZI, C. H. S.; DANTAS, V. F. de S. **Propriedades físicas e mecânicas da madeira de sucupira branca [*pterodon pubescens* (benth.) benth.]**. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal*, Garça, SP, v. 18, n.1, p. 118-125, 2011.

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

VALE, A. T., NOGUEIRA, M. V. P. **Variação longitudinal da densidade básica e contração da madeira de *Dalbergia miscolobium* Benth**; *Revista Árvore*; v.22; n.3; p.429-432; Viçosa; 1998.

- VALE, A. T.; ABREU, V. L. S.; GONÇALVES, J. C.; COSTA, A. F da. **Estimativa do poder calorífico superior do carvão vegetal de madeiras de *Eucalyptus grandis* em função do teor de carbono fixo e do teor de materiais voláteis.** Brasil Florestal, n.73, p.47-52, 2002b.
- VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. **Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação.** Cerne, Lavras, v. 6, n.1, p 83-88, 2000c.
- VALE, A. T.; LEÃO, A.L.; BRASIL, M.A.M. **Caracterização da madeira e da casca de *Sclerolobium paniculatum*, *Dalbergia miscolobium* e *Pterodon pubescens* para uso energético,** nº 26; In: 3º Encontro de Energia Rural, AGRENER, 2000b. Campinas - SP.
- VALE, A. T.; MARTINS, I. S., ARAUJO, W. L. O. **Estudo da densidade básica de três espécies do cerrado.** Revista Árvore; v.16; n.2; p.209-217; Viçosa; 1992.
- VALE, A. T.; NOGUEIRA, M. **Carbonização de madeiras do cerrado e análise do carvão vegetal.** Revista Árvore, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 271-276, 2001.
- VALE, A. T.; NOGUEIRA, M. V. P.; SILVA, M. A. **Rendimento da carbonização e qualidade do carvão vegetal de madeiras do cerrado em comparação ao *Eucalyptus grandis*.** Revista Árvore, v.20, n.1, p.93-99, 1996.
- VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil.** BNDES Setorial, v. 30, p. 237-297, 2009.