



**TATTIANE GOMES COSTA**

**PROPRIEDADES DA MADEIRA DE ESPÉCIES  
DO CERRADO MINEIRO E SUA  
POTENCIALIDADE PARA GERAÇÃO DE  
ENERGIA**

**LAVRAS-MG  
2011**

**TATTIANE GOMES COSTA**

**PROPRIEDADES DA MADEIRA DE ESPÉCIES DO CERRADO  
MINEIRO E SUA POTENCIALIDADE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia  
da Madeira, área de concentração em  
Processamento e Utilização da Madeira,  
para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Dra. Maria Lúcia Bianchi  
Co-orientadores: Dr. Paulo Fernando Trugilho;  
Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

**LAVRAS- MG  
2011**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos  
Técnicos da Biblioteca da UFLA**

Costa, Tattiane Gomes.

Propriedades da madeira de espécies do Cerrado Mineiro e sua potencialidade para geração de energia / Tattiane Gomes Costa. – Lavras : UFLA, 2011.

75 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Maria Lucia Bianchi.

Bibliografia.

1. Madeira nativa. 2. Carvão vegetal. 3. Análise térmica. 4. Árvore nativa. 5. Composição química. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.1

**TATTIANE GOMES COSTA**

**PROPRIEDADES DA MADEIRA DE ESPÉCIES DO CERRADO  
MINEIRO E SUA POTENCIALIDADE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia  
da Madeira, área de concentração em  
Processamento e Utilização da Madeira,  
para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de fevereiro de 2011

Dr. Paulo Fernando Trugilho

UFLA

Dr. Heber dos Santos Abreu

UFRRJ

Dra. Maria Lúcia Bianchi

Orientadora

**LAVRAS – MG  
2011**

Aos meus pais S ezar e Adeilde  
As minhas irm es Michelle e M rcia

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e pela oportunidade de está aqui;

A Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira pela oportunidade da realização deste trabalho;

A CAPES pelo financiamento deste trabalho;

A minha orientadora Dr. Maria Lúcia Bianchi e aos co-orientadores Dr. Paulo Fernando Trugilho e Dr. José Reinaldo pela confiança, pela dedicação, amizade e pelos ensinamentos que foram fundamentais para o meu crescimento profissional;

Ao José Pedro de Oliveira por ter disponibilizado o material de estudo e por todo o auxílio, sem o qual não seria possível desenvolver este projeto, meus sinceros agradecimentos;

Aos funcionários da Tecnologia da Madeira Claret, Meire, José Francisco, Cris e Wilson por toda ajuda, conversas e incentivos;

Ao meu pai, Sêzar Augusto, por está sempre comigo, me apoiando em tudo, agradeço pelo incentivo, dicas e pelo teu amor;

As minhas irmãs pela força e pelas palavras de carinho e incentivo;

Ao Robson, por todo carinho, amor e apoio;

A todos colegas que me acompanharam nesta caminhada Alessandra, Marcelo Xisto, Lina, Otávio, Thiago, Allan, Ariclene, Thiago de Paula, Isabel, Edson, Natália, Danuza e Agda,;

Aos meus queridos amigos e amigas, companheiros de todas as horas, que alegram meus dias: Natália, Iara, Simone, Inêz, José Rogério, Andreza, Gleison, Sheila, Nazaré, Rafael, Tássia, Thiago Monteiro, Anderson, Deivid, Gabryella, Keila, e Samoel;

E por fim, a todos que participaram dessa etapa da minha vida.

## RESUMO

Existe uma grande demanda de carvão vegetal para suprir a indústria siderúrgica e boa parte do carvão produzido é de madeiras nativas provenientes em grande parte do Cerrado. O governo estipulou prazo até 2013 para que as indústrias deixem de comprar carvão de mata nativa. Assim a indústria somente poderá usar este recurso natural através de planos de manejo sustentável, para manter o seu suprimento de madeira para produção de carvão vegetal. Para que isso seja possível é necessário fomentar pesquisas científicas envolvendo espécies nativas, levantar informações sobre os recursos florestais disponíveis e o uso sustentável desses recursos. Portanto, o objetivo deste trabalho foi determinar as propriedades químicas, físicas e térmicas de cinco espécies de ocorrência no Cerrado Mineiro e a avaliar sua potencialidade para geração de energia. As espécies estudadas foram: *Luehea divaricata*, *Casearia sylvestris*, *Guazuma ulmifolia*, *Rapanea ferruginea* e *Trema micrantha*. Foram amostradas quatro árvores de cada espécie, das quais foram retirados um torete de 75 cm, este foi seccionado em discos que foram divididos em quatro pares de cunhas opostas. Foram realizadas análises para determinação da densidade básica das madeiras, teores de lignina, extrativos e cinzas nas várias amostras, análises térmicas (TG, DTA e DSC) da madeira. O material foi carbonizado, posteriormente foram realizadas análises imediatas do carvão, análise elementar (CHNSO) e poder calorífico da madeira e do carvão. A *Casearia sylvestris* foi à espécie que apresentou as melhores características para produção e qualidade do carvão, por apresentar elevada densidade básica, teor de lignina, alta estabilidade térmica, alto rendimento em carvão, alto teor de carbono e poder calorífico na madeira. A *Trema micrantha* apesar de possuir a menor densidade básica da madeira e baixa densidade do carvão, apresentou alto teor de carbono fixo e gerou o carvão com maior poder calorífico. A *Rapanea ferruginea* apresentou os menores teores de lignina, extrativos e menor rendimento em carvão. A madeira da espécie *Guazuma ulmifolia* apresentou o maior teor de extrativos, menor teor de cinzas, e alta estabilidade térmica. A espécie que apresentou o carvão com menor poder calorífico foi a *Luehea divaricata*, essa espécie se destacou quanto à estabilidade térmica na faixa de temperatura de 200 a 380° C, apresentando a menor perda de massa nestas temperaturas.

**Palavras-chave:** carvão vegetal, Cerrado, composição química, análise térmica

## ABSTRACT

There is a great demand for charcoal to supply steel industry and a large amount of the charcoal produced is from native wood from a wide area of Cerrado. The government established a dateline until 2013 for the industries to stop buying charcoal from native forests. Therefore, the industry will be only able to natural resource through sustainable management plan to keep their wood supply for charcoal production. In order to achieve this goal, it is necessary to provide scientific research involving native species, to obtain information about available forest resources and their sustainable use. Therefore, the aim of this work was to determine chemical, physical and thermal properties of five species from Cerrado Mineiro and to evaluate their potential for energy generation. The species studied were *Luehea divaricata*, *Casearia sylvestris*, *Guazuma ulmifolia*, *Rapanea ferruginea* and *Trema micrantha*. Four trees of each species were sample from which 75 cm small logs were obtained. The logs were cutted into discs which were divided in four pars of opposed wedges. Analysis for determination of the basic density were made, basic density, lignin, extractives and ash contents were determined in the several samples, thermal analysis (TG, DTA and DSC) of wood. The material was carbonized after what proximate analysis of charcoal, elemental analysis (CHNSO) and heating value of the wood and charcoal were made. *Casearia sylvestris* was the species which presented the best characteristics for production and quality of charcoal since it presented high basic density, lignin content, thermal stability, charcoal yield, carbon content and heating value of wood. Although *Trema micrantha* had low basic density, it presented high fixed carbon content and generated charcoal with greater heating value. *Rapanea ferruginea* presented the lowest lignin and extractives contents and lower charcoal yield. Wood from *Guazuma ulmifolia* species had the highest extractive content, lowest ash content and high thermal stability. The species which presented charcoal with lowest heating value was *Luehea divaricata*, which stood out in thermal stability in the temperature range from 200 to 380° C, presenting the lowest mass losses in these temperatures.

**Key-words:** charcoal, Cerrado, chemical composition, thermal analysis



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Decomposição térmica dos componentes isolados da madeira.....	26
Figura 2- Ilustração da retirada dos toretes e dos discos para análises.....	29
Figura 3 - Diagrama do preparo das amostras para as análises químicas, físicas e térmica.....	30
Figura 4-Equipamento usado para carbonizar a madeira.....	33
Figura 5 - Esquema do preparo das amostras de carvão para as análises químicas imediata, poder calorífico e CHNS-O .....	35
Figura 6 - Valores médios de densidade básica seguido do teste de comparação múltipla .....	38
Figura 7 - Curvas de perda de massa ou termogravimetria (TG) e picos das reações envolvidas na análise térmica diferencial (DTA) das espécies: a) <i>Casearia sylvestris</i> , b) <i>Guazuma ulmifolia</i> .....	46
Figura 8- Curvas de perda de massa ou termogravimetria (TG) e picos das reações envolvidas na análise térmica diferencial (DTA) das espécies: a) <i>Luehea divaricata</i> , b) <i>Rapanea ferruginea</i> e c) <i>Trema micrantha</i> .....	46-47
Figura 9- Curvas de DSC das cinco espécies em estudo: a) <i>Casearia sylvestris</i> , b) <i>Guazuma ulmifolia</i> .....	48
Figura 10- Curvas de DSC das cinco espécies em estudo: a) <i>Luehea divaricata</i> b) <i>Rapanea ferruginea</i> e c) <i>Trema micrantha</i> .....	49
Figura 11- Espectros na região do infravermelho das espécies estudadas: a) <i>Casearia sylvestris</i> , b) <i>Luehea divaricata</i> .....	52

Figura 12- Espectros na região do infravermelho das espécies estudadas: a) *Luehea divaricata*, b) *Rapanea ferruginea*, c) *Trema micrantha*.....52-53

Figura 13- Rendimento Gravimétrico (RG) de carvão das espécies estudadas  
.....54

Figura 14 - Valores médios da densidade relativa aparente do carvão vegetal  
seguido do Teste de comparação múltipla.....55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores médios dos teores de extrativos (Ext), lignina (lig), holocelulose (holo) e cinzas (Cz) da madeira seguida do Teste de Média de Tukey .....	40
Tabela 2- Valores médios da perda de massa (TG) em diferentes intervalos de temperaturas.....	43
Tabela 3 - Valores médios do teor de materiais voláteis (TMV), teor de carbono fixo (TCF), teor de cinzas no carvão (TCZ), com respectivo teste de comparação.....	57
Tabela 4- Valores médios dos componentes elementares da madeira e do carvão vegetal:C-carbono,H-Hidrogênio,N-nitrogênio oxigênio.....	59
Tabela 5 - Poder Calorífico Superior (PCS) da madeira e do carvão vegetal das cinco espécies estudadas.....	60

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Cerrado .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Espécies Nativas Potenciais para Geração de Energia.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Luehea divaricata</i> .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2</b>	<b><i>Casearia sylvestris</i>.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.3</b>	<b><i>Guazuma ulmifolia</i>.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.4</b>	<b><i>Rapanea ferruginea</i> .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.5</b>	<b><i>Trema micrantha</i>.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Setor siderúrgico .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>Carvão Vegetal.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>Qualidade do Carvão Vegetal .....</b>	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>Análise térmica .....</b>	<b>24</b>
<b>2.7</b>	<b>A decomposição térmica da madeira .....</b>	<b>25</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Material de Estudo.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>Amostragem.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3</b>	<b>Preparo das Amostras de Madeira .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4</b>	<b>Densidade Básica da Madeira.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5</b>	<b>Análise Química da Madeira .....</b>	<b>31</b>

<b>3.6</b>	<b>Análise Térmica da Madeira.....</b>	<b>31</b>
<b>3.7</b>	<b>Infravermelho (FTIR).....</b>	<b>32</b>
<b>3.8</b>	<b>Carbonização da Madeira (preparação do carvão) .....</b>	<b>32</b>
<b>3.9</b>	<b>Preparo das Amostras do Carvão .....</b>	<b>34</b>
<b>3.10</b>	<b>Análise Química Imediata do Carvão .....</b>	<b>35</b>
<b>3.11</b>	<b>Análise dos Componentes Elementares (CHNS-O).....</b>	<b>36</b>
<b>3.12</b>	<b>Poder Calorífico Superior .....</b>	<b>36</b>
<b>3.13</b>	<b>Análise Estatística .....</b>	<b>36</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Densidade Básica.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise química da madeira.....</b>	<b>39</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise Térmica .....</b>	<b>42</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise de Infravermelho .....</b>	<b>51</b>
<b>4.5</b>	<b>Rendimento Gravimétrico do Carvão Vegetal.....</b>	<b>53</b>
<b>4.6</b>	<b>Análise química imediata do carvão vegetal .....</b>	<b>56</b>
<b>4.7</b>	<b>CHNSO das amostras de madeira e do carvão vegetal .</b>	<b>58</b>
<b>4.8</b>	<b>Poder Calorífico Superior .....</b>	<b>60</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXO I .....</b>	<b>73</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O Cerrado é responsável por 5% da biodiversidade do planeta, uma das savanas mais ricas do mundo, porém um dos biomas mais ameaçados do Brasil (BRASIL, 2007).

Em 2009, o Projeto de Monitoramento do Desmatamento nos Biomas Brasileiros por Satélite (BRASIL, 2009) quantificou as áreas de desmatamento da vegetação nativa no bioma Cerrado e, segundo seus resultados, entre 2002 e 2008, o Cerrado teve a sua cobertura vegetal suprimida em mais de 85 mil km<sup>2</sup>, quase 50% de sua vegetação nativa.

A grande demanda por carvão vegetal para suprir as indústrias siderúrgicas é um dos fatores que contribuem com o desmatamento. O setor siderúrgico, que utiliza o carvão vegetal como matriz energética, experimentou, nos últimos 10 anos, um aumento de mais de 50% no consumo desse produto. Segundo o Ministro do Meio Ambiente, Carlos Minc, metade do carvão vegetal usado na indústria siderúrgica hoje é de mata nativa, muitas vezes de Cerrado (AGÊNCIA BRASIL, 2010). O principal destino do carvão vegetal produzido a partir de madeira nativa do Cerrado é o Estado de Minas Gerais (DOCUMENTO..., 2010).

Ainda, segundo Agência Brasil (2010), as indústrias que usam carvão vegetal terão prazo até 2013 para deixar de comprar carvão de mata nativa do Cerrado. Essa medida consta do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento no Cerrado (BRASIL, 2010), decretado em 15/09/2010 pelo Presidente Luiz Inácio Lula da Silva e que prevê 151 ações para reduzir a perda da cobertura vegetal e promover a proteção e o uso sustentável dos recursos desse bioma (PLANETA SUSTENTÁVEL, 2010).

Um dos pontos abordados nesse Plano (PPCerrado) é o manejo florestal sustentável no Cerrado, principalmente para fins energéticos. Assim, as

siderúrgicas devem manter seu suprimento de carvão vegetal por meio de florestas plantadas e de recursos oriundos de manejo florestal, realizado por meio de Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS).

Para que seja possível realizar um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), primeiramente existe a necessidade de fomentar pesquisas científicas com espécies nativas, levantando informações sobre os recursos florestais disponíveis, o uso sustentável desses recursos, a vegetação nativa, o manejo mais adequado das espécies, o crescimento, a biomassa, o estoque de carbono, dentre outros.

Esse trabalho vem contribuir com o PPCerrado, uma vez que visa o estudo (físico, químico e térmico) de algumas espécies desse bioma. As informações aqui adquiridas, juntamente com outros temas de pesquisa, poderão, num futuro muito próximo, servir de subsídios para a formulação de políticas públicas de fomento ao manejo florestal e uso sustentável do Cerrado para a produção de energia.

Neste contexto, este trabalho foi realizado com o objetivo de fazer o estudo químico, físico e térmico de algumas espécies nativas do Cerrado encontradas no Estado de Minas Gerais e avaliar a potencialidade destas espécies na geração de energia.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Cerrado**

O Cerrado é a segunda maior formação vegetal do Brasil, ocupando originalmente cerca de dois milhões de hectares, o equivalente a 24% do território nacional. Abrange o Distrito Federal e mais dez estados: Goiás, Mato Grosso,



Mato Grosso do Sul, Tocantins, Maranhão, Bahia, Piauí, Minas Gerais, São Paulo e Paraná (BRASIL, 2010).

O bioma Cerrado faz limite com mais quatro outros biomas brasileiros: Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica e Pantanal. Nenhum outro bioma sul americano possui tantas zonas de contato biogeográficas tão distintas, conferindo-lhe um aspecto ecológico único (BRASIL, 2010).

O Cerrado é caracterizado por apresentar cobertura florestal composta por árvores pequenas e retorcidas. Possui grande diversidade de espécies vegetais. Estima-se que existam aproximadamente 10 mil espécies vegetais neste bioma, podendo apresentar desde formações campestres bem abertos até formações densas de florestas, como o cerradão. Além da grande diversidade de espécies vegetais, o cerrado possui alta diversidade de solo e de fauna. Por essas razões é considerado um dos biomas mais ricos, mas também um dos mais ameaçados do mundo (MEYERS et al., 2000).

A região dos cerrados, antes relegada e considerada como área pobre e inapta, tem se revelado, apesar das limitações químicas de seus solos e da má distribuição das chuvas, como importante provedora na crescente demanda por bens de consumo de origem vegetal, animal e agroindustrial. No entanto, ainda são escassos os estudos relativos às plantas nativas. Isso tem acarretado dificuldades na utilização dessas espécies, seja como opções de uso econômico, ou como forma de recomposição e recuperação de áreas devastadas (SILVA et al., 2004). As espécies nativas, em sua maioria, apresentam possibilidade de múltiplos usos, além de reunirem características favoráveis de adaptação às condições do ambiente.

## 2.2 Espécies nativas potenciais para geração de energia

### 2.2.1 *Luehea divaricata* Martius & Zuccarini

Conhecida popularmente como açoita-cavalo a *Luehea divaricata* é uma espécie heliófila, pertencente à família Tilaceae. Apresenta árvore caducifólia, com porte de 5 m a 15 m de altura e 20 cm a 50 cm de diâmetro a altura do peito, mas podem atingir até 30 m de altura e 100 cm de diâmetro. Possui tronco tortuoso e folhas simples e alternas. É uma espécie pioneira de rápido crescimento, podendo atingir até 3,5 m aos 2 anos de idade (CARVALHO, 1994).

A *Luehea divaricata* possui madeira moderadamente pesada, com densidade de 0,64 g/cm<sup>3</sup>, textura média, grã direta, resistente, flexível e de baixa resistência ao ataque de xilófagos. A madeira é empregada na confecção de móveis curvados, na construção civil, caixotaria, coronha de armas (LORENZI, 1992).

### 2.2.2 *Casearia sylvestris* Sw.

Popularmente conhecida como pau-de-lagarto a *Casearia sylvestris* é uma espécie pioneira, perenifólia, heliófila, pertencente à família Flacourtiaceae. Chega a atingir 20 m de altura e diâmetro de 40 cm quando adulta. Possui tronco reto a tortuoso e folhas simples (CARVALHO, 2007).

A *Casearia sylvestris* possui madeira moderadamente pesada, com densidade de 0,84 g/cm<sup>3</sup>, dura e de baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos. A madeira é utilizada na construção civil, tabuas de assoalhos, tacos, marcenaria e carpintaria, lenha (LORENZI, 1992).

### **2.2.3 *Guazuma ulmifolia* Lam.**

A *Guazuma ulmifolia* é conhecida como mutamba, pertence à família Sterculiaceae, é uma espécie pioneira, perenifolia, semidecídua e heliófita (LORENZI, 1992). Pode chegar a um porte de até 30 m de altura e 60 cm de diâmetro quando adulta. Possui tronco reto a levemente tortuoso e folhas simples alterna (CARVALHO, 2007).

A madeira de *Guazuma ulmifolia* é moderadamente densa, com densidade de 0,50 g/cm<sup>3</sup> a 0,68g/cm<sup>3</sup>. Sendo empregada na confecção de tonéis, construções internas, caixotaria, carvão e pasta celulósica (LORENZI, 1992).

### **2.2.4 *Rapanea ferruginea* (Ruiz & Pavon) Mez**

Conhecida popularmente por capororoca a *Rapanea ferruginea* é uma espécie pioneira, perenifolia, heliófita, seletiva higrófita, pertencente à família Myrsinaceae. Apresenta porte de 5 m a 10 m de altura e de 20 cm a 30 cm de diâmetro, podendo atingir até 20 m de altura e 60 cm de diâmetro (LORENZI, 1992).

Apresenta madeira moderadamente densa, com densidade de 0,50 g/cm<sup>3</sup> a 0,60 g/cm<sup>3</sup> empregada em construções internas, confecção de móveis, lenha e carvão (LORENZI, 1992).

### **2.2.5 *Trema micrantha* (L.) Blum.**

A *Trema micrantha* é popularmente conhecida como pau-de-pólvora, é uma espécie pioneira, perenifolia ou semidecídua, heliófita, pertencente à família

Ulmaceae. Possui porte de 4 m a 15 m de altura e de 10 cm a 25 cm de diâmetro, podendo atingir 20 m de altura e 70 cm de diâmetro (LORENZI, 1992).

A madeira é leve, possuindo densidade básica média de 0,40 g/cm<sup>3</sup>, sendo empregada na confecção de caixotes, na fabricação de pólvora e lenha (CARVALHO, 1994).

### **2.3 Setor siderúrgico**

A vocação siderúrgica do Brasil vem desde o ciclo do ouro no século XVIII, mas a Coroa Portuguesa nesta época não se interessou pela sua emancipação econômica e determinou o fechamento de todas as fundições existentes. Somente no século XIX foi novamente permitida a abertura das fundições. Porém, devido à falta de incentivos, a consolidação do setor siderúrgico no Brasil só ocorreu no século XX (BOZZINI, 2003).

O Brasil é o único país que produz carvão vegetal em larga escala para ser utilizado na indústria. Em 2009 foram produzidos 6,34 milhões de toneladas de carvão vegetal no Brasil, sendo 5,11 milhões de toneladas destinadas para a indústria (BRASIL, 2010). Cerca de 80% do carvão vegetal produzido no país é destinado para suprir a demanda da indústria siderúrgica. Este carvão vegetal é utilizado na redução do minério de ferro a ferro-gusa. A gusa produzida é de alta qualidade, principalmente para produção de aços especiais (INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - INEE, 2006). Os principais produtos da indústria siderúrgica são o ferro-gusa e o ferro-liga, estes são utilizados na produção de ferro fundido e aço.

A indústria siderúrgica foi fortemente afetada pela crise de ordem econômica ocorrida no cenário mundial a partir de setembro de 2008, provocando acentuadas alterações na economia nacional, o que levou a redução da produção

de ferro-liga e ferro-gusa. O carvão vegetal que chegou a ser comercializado a R\$ 180,00/mdc (metros de carvão) em junho e julho de 2008, chegou a R\$ 82,00/mdc em março de 2009 e em outubro de 2010 atingiu R\$ 99,00/mdc (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA - AMS, 2009).

Em 2009, os principais produtores de carvão a partir da extração vegetal foram Maranhão (28,9% da produção nacional), Mato Grosso do Sul (17,7%), Minas Gerais (17,2%), Bahia (8,7%) e Goiás (8,1%). Os principais estados produtores de carvão vegetal de florestas plantadas no Brasil são Minas Gerais (80,4% da produção nacional), Maranhão (6,7%), Bahia (5,4%), São Paulo (2,0%), e Mato Grosso do Sul (1,6%). Portanto, Minas Gerais é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do Brasil. Esse estado é privilegiado por suas reservas de minério de ferro e pela grande disponibilidade de material lenhoso. Esses fatores foram fundamentais para o estabelecimento e consolidação das grandes indústrias siderúrgicas nessa região. Minas Gerais concentrou 80% da produção nacional de carvão vegetal no ano de 2009 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010).

Em 2009 foram consumidos no Brasil 20,206 milhões de mdc de carvão vegetal, destes, 29,8% era carvão vegetal de origem nativa, ou seja, 6,013 milhões de mdc de carvão vegetal (AMS, 2009). Não existem florestas plantadas suficiente para suprir a demanda de carvão vegetal, sendo, portanto, boa parte do carvão de origem nativa, ocasionado uma pressão sobre os remanescentes florestais.

## 2.4 Carvão Vegetal

O carvão vegetal é um produto sólido resultante da carbonização da madeira, cujas características permitem que seja usado como combustível e redutor (PENEDO, 1981).

A carbonização é um processo de oxirredução na qual uma parte da biomassa é reduzida a carbono e, a outra parte, é oxidada e hidrolisada dando origem a fenóis, carboidratos, alcoóis, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos. Esses produtos primários combinam-se entre si para gerar moléculas mais complexas tais como ésteres produtos poliméricos (ROCHA; MESA-PÉREZ; CORTEZ, 2004). O processo de carbonização consiste em concentrar carbono e expulsar oxigênio tendo como consequência o aumento do conteúdo energético do produto. A relação teor de carbono no carvão vegetal e o teor de carbono na madeira são de aproximadamente 1,7 (BRAGA, 1992).

No processo de carbonização a transformação térmica da madeira ocorre na presença controlada de oxigênio ou ar e com calor sendo fornecido por uma fonte externa, enquanto que a combustão é a transformação térmica em presença de oxigênio ou ar, em quantidade suficiente para promover sua decomposição completa (VALENTE; LELLES, 1986). O objetivo maior da carbonização é aumentar o teor de carbono fixo na madeira, por meio de tratamento térmico (ALMEIDA; REZENDE, 1982).

Segundo Medeiros e Rezende (1983), a carbonização pode ser dividida em quatro etapas de acordo com a temperatura:

I) abaixo de 200 °C: ocorre a secagem e inicia-se a decomposição térmica da madeira;

II) de 200° a 280 °C: predominância de reações endotérmicas, com liberação de ácido acético, metanol, água, CO<sub>2</sub>, etc.;

III) de 280° a 500 °C: predominância de reações exotérmicas que levam à liberação de gases combustíveis, como CO, CH<sub>4</sub>, etc. e alcatrões;

IV) acima de 500 °C: o carvão já está estável e apenas pequenas quantidades de materiais voláteis, principalmente H<sub>2</sub>, são liberadas.

A decomposição térmica ou pirólise da madeira pode resultar em um produto gasoso ou em outros produtos de valor energético, como é o caso do carvão vegetal, cuja menor umidade, assim como uma maior densidade energética e homogeneidade, é uma vantagem de particular interesse (ASSIS et al., 2007).

## **2.5 Qualidade do Carvão Vegetal**

Para determinar a qualidade do carvão vegetal para fins industriais, deve-se conhecer as características físicas e químicas do carvão vegetal e também da madeira que lhe deu origem. A qualidade da madeira influencia diretamente na qualidade do carvão. Diversos estudos mostram altas correlações entre as características do carvão vegetal e as propriedades da madeira de origem (BRITO; BARRICHELO, 1980). Além disso, fatores como espécies, idade e tipo de plantio também influem nas propriedades finais do carvão vegetal.

Segundo Trugilho et al. (2001), um problema relacionado à utilização do carvão vegetal é sua alta variabilidade em qualidade, uma vez que esse produto sofre grande influência da madeira que lhe deu origem e do sistema de produção. Essa variabilidade ocasiona grande desperdício do material, pois dificulta a operação dos alto-fornos siderúrgicos.

A composição química da madeira exerce influência direta sobre as propriedades do carvão vegetal. A madeira é composta quimicamente por substâncias macromoleculares (celulose, hemicelulose e lignina), por

componentes elementares (carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio) e por componentes minoritários de baixo peso molecular (extrativos e substâncias minerais) (KCLOK; MUNIZ, 2005).

A lignina é um composto fenólico extremamente complexo, possui estrutura aromática, tridimensional, apresentando ligações cruzadas com os carboidratos da parede celular (BARRICHELO; BRITO, 1985), o que lhe confere alta resistência a degradação térmica. O processo de degradação térmica da lignina é lento quando comparado com os outros componentes químicos da madeira. A lignina começa a degradar em temperatura mais baixa, a partir de 150° C, porém continua a perder massa em temperaturas superiores a 500°C. A perda final de massa da lignina é bem menor que a da celulose e hemiceluloses. Por essa razão, a lignina proporciona maior rendimento em carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do carvão no processo de carbonização está intimamente ligado a quantidade de lignina na madeira. Além disso, quanto maior o teor de lignina, maior será o teor de carbono fixo no carvão, portanto, a lignina é o componente mais importante quando a finalidade da madeira é a produção de carvão vegetal (BRITO; BARRICHELO, 1977; OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982).

O estudo da composição química do carvão vegetal através da análise química imediata é também de grande valia para determinar a qualidade do carvão. A análise química imediata do carvão vegetal indica os teores de materiais voláteis, de carbono fixo e de cinzas.

Os materiais voláteis eliminados durante o processo de carbonização são formados por carbono, hidrogênio e oxigênio. O alto teor de materiais voláteis facilita a ignição e a velocidade de combustão (PINHEIRO et al., 2008). Porém, alto teor desse material implica em menor teor de carbono fixo.

O teor de carbono fixo é outra característica importante para determinar a produtividade e a qualidade do carvão vegetal (ANDRADE, 1989). O carbono



fixo é a quantidade de carbono contido no carvão e está correlacionado com a quantidade de lignina existente na madeira. Oliveira (1988) afirma que a quantidade de carbono fixo está diretamente relacionada à densidade básica da madeira, a lignina, extrativos e é inversamente proporcional ao teor de holocelulose.

Segundo Brito (1990), as cinzas são elementos minerais quantitativamente minoritários originalmente encontrados na madeira. Estes materiais minerais não se volatilizam em temperaturas normais de carbonização, ficando, portanto, contido no carvão (VELLA et al., 1989). As cinzas são compostas principalmente por óxidos de K, Ca, Mg, S, P (KLOCK; MUNIZ, 2005). O alto teor de cinzas no carvão vegetal pode prejudicar a produção de ferroligas e ferrogusas, podendo provocar, no caso do ferrogusa, o fenômeno da segregação, que consiste no acúmulo de impurezas que, não sendo tão solúveis no metal sólido quanto o são no metal líquido, vão sendo repelidas para o centro das peças, tornando os produtos duros e quebradiços, menos maleáveis e com campos favoráveis à propagação de fissuras (ANDRADE, 1993).

As propriedades físicas da madeira também exercem influência direta na qualidade do carvão vegetal. Dentre as principais características físicas da madeira a ser avaliada estão à densidade e o poder calorífico.

A densidade da madeira também afeta a qualidade final do carvão vegetal. Segundo Trugilho (2006), existe uma relação direta ou proporcional entre a densidade básica da madeira e a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Portanto, quanto maior densidade básica da madeira maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Brito (1990), estudando as correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão, observou a existência de correlação entre a densidade da madeira e a densidade do carvão vegetal. O autor ainda afirmou que a densidade básica da

madeira pode orientar a escolha de espécies destinadas para a produção de carvão, assim como pode nortear as pesquisas sobre melhoramento das características do carvão vegetal.

Jara (1989) define o poder calorífico da madeira como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira, dado em cal/g ou kcal/kg. Há dois tipos de poder calorífico o superior e inferior. O poder calorífico superior é obtido através de equipamentos chamados de calorímetro que mede a máxima quantidade de energia que um combustível pode liberar, pois aqui o calor latente do vapor d'água não é perdido. Já o poder calorífico inferior não leva em consideração o calor latente do vapor d' água (TRUGILHO, 2006). Segundo o mesmo autor o poder calorífico da madeira pode variar de 3.000 a 5400 kcal/kg dependendo da espécie. Segundo Cunha et al. (1989) o poder calorífico da madeira é mais alto quanto maior o teor de lignina e extrativos. Satanoka (1963 citado por BRITO; BARRICHELO, 1977), afirma que madeiras com maior teor em lignina resultam em carvão com maior poder calorífico.

## **2.6 Análise térmica**

A análise térmica corresponde a um grupo de técnicas através das quais uma propriedade física de uma substância, ou de seus produtos de reação é medida em função da temperatura, ou tempo, enquanto a substância é submetida a um aumento programado e controlado de temperatura (IONASHIRO; GIOLITO, 1980). Em análise térmica, as variações de massa são medidas através da termogravimetria (TG) enquanto as medidas de variações de energia formam as bases técnicas da análise térmica diferencial (DTA - do inglês "Differential Thermal Analysis") e da calorimetria exploratória diferencial (DSC - do inglês

“Differential Scanning Calorimetry”). A TG reporta o quanto a amostra está perdendo massa e quanto é esta massa, o DTA ou DSC informa se a reação é exotérmica (libera calor) ou endotérmica (absorve calor), sendo que o DSC é capaz de fornecer a quantidade de calor envolvido (BROWN, 2001).

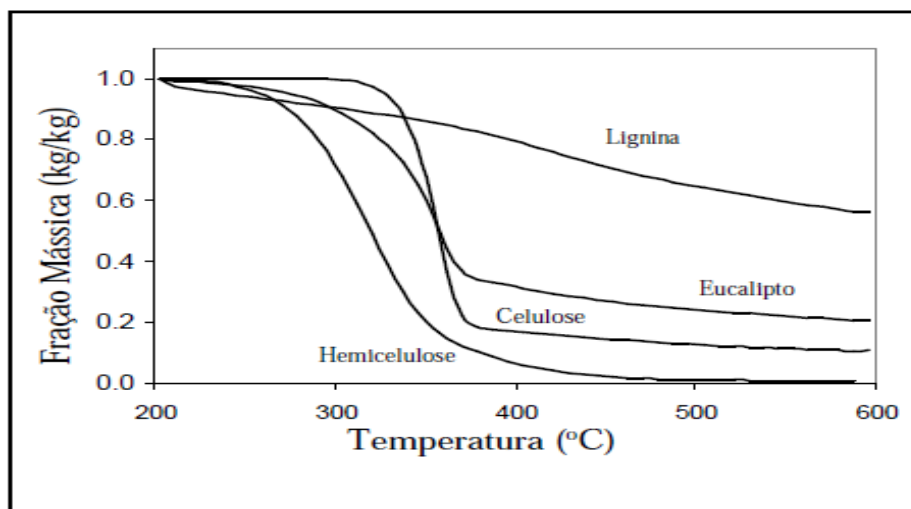
A análise térmica diferencial (DTA) mede a diferença entre a amostra e a referência, em função da temperatura, quando ambos são submetidos a um programa controlado de temperatura. A calorimetria exploratória diferencial (DSC) mede a quantidade de energia absorvida ou liberada pela amostra em função da temperatura ou do tempo (IONASHIRO; GIOLITO, 2005). Como consequência direta das medidas de energia, a temperatura precisa da amostra pode ser monitorada em qualquer ponto durante a análise.

As análises de DSC permitem determinações quantitativas, estando à área dos picos relacionada à energia envolvida no processo, sendo utilizados padrões para calibração do equipamento. Estes padrões apresentam variação de entalpia conhecida, normalmente de fusão, sendo a área do pico deste processo comparada à área do processo apresentado pela amostra (BERNAL et al., 2002).

## **2.7 A decomposição térmica da madeira**

A pirólise dos materiais lignocelulósicos é bastante complexa, pois o processo inclui numerosas reações químicas competitivas e consecutivas (ÓRFÃO; FIGUEIREDO, 2001). A taxa de degradação da biomassa é considerada como a soma da contribuição dos seus principais componentes, celulose, hemiceluloses e lignina. Assumindo que celulose, hemiceluloses e lignina decompõem-se independentemente, um pré-tratamento em conjunto com a separação dos componentes majoritários pode permitir a investigação da decomposição destes componentes, já que o comportamento de degradação de

cada componente ocorre em temperaturas diferentes (Figura 1). Entretanto, as técnicas de separação comumente utilizadas para reduzir a estrutura complexa da madeira incluem grande despolimerização e mudanças estruturais, que podem levar os parâmetros cinéticos a não representarem a decomposição da madeira (MÜLLER-HAGEDORN et al., 2002).



Fonte: Raad et al. (2006)

Figura 1 Decomposição térmica dos componentes isolados da madeira

Vários autores (BRANCA; BLASI, 2003; CORDERO et al., 1989; ÓRFÃO; ANTUNES; FIGUEIREDO, 1999; ÓRFÃO; FIGUEIREDO, 2001), estudando a cinética de degradação global da madeira, mostraram que existem três zonas principais de reação. A primeira consiste na degradação da fração mais reativa de hemiceluloses e ocorre em temperaturas mais baixas. Na segunda zona de reação, ocorre a degradação principalmente de celulose e parte da lignina e hemiceluloses, considerando-se que as hemiceluloses reagem completamente durante o período de pré-aquecimento dessa fase. A terceira e última etapa, que

ocorre nas temperaturas mais elevadas, correspondem à degradação de lignina e pequenas frações de celulose, sendo a lignina dominante em altas conversões.

As duas exotermas principais observadas na análise da madeira por DSC, em 350 e 465°C foram designadas a polissacarídeos amorfos e a misturas de lignina e polissacarídeos, respectivamente (TSUJIYAMA; MIYAMORI, 2000).

As diferenças nas madeiras de espécies variadas ocorrem não somente devido à composição diferente em relação aos principais componentes da madeira (celulose, lignina e hemiceluloses), mas também devido à variação no comportamento termoquímico da degradação da lignina e no início do estágio de degradação das hemiceluloses (MÜLLER-HAGEDORN et al., 2002, 2003). A lignina é termicamente mais resistente que os carboidratos da madeira. Em temperaturas acima de 600°C, perdas de massa de hemiceluloses atingem mais que 95%, para celulose a perda de massa fica em torno de 80% e para ligninas tal perda não ultrapassa 60% (BARTKOWIAK; ZAKRZEWSKI, 2004). Portanto, é o componente da biomassa responsável pela maior parte da produção de carvão (BARTKOWIAK; ZAKRZEWSKI, 2004; ÓRFÃO; ANTUNES; FIGUEIREDO, 1999; VÁRHEGYI et al., 1997).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Material de estudo**

Foram utilizadas cinco espécies de madeiras nativas do Cerrado procedentes do Estado de Minas Gerais. As espécies eleitas foram: *Luehea divaricata*, *Casearia sylvestris*, *Guazuma ulmifolia*, *Rapanea ferruginea* e *Trema micrantha*. Estas foram selecionadas por serem espécies pioneiras de rápido

crescimento, conservação comum e apresentam densidade da madeira variando de média a alta.

As árvores foram coletadas na Fazenda Campo Lindo, localizada no acesso Br 265, quilômetro 324 sentido São João Del Rei estrada Cachoeira do Pilão, na Cidade de Itumirim- MG.

### **3.2 Amostragem**

Foram amostradas quatro árvores de cada espécie. De cada árvore foi retirado um torete de 75 cm, a partir da altura de 30 cm do chão. Os toretes foram seccionados em 15 discos de aproximadamente 5 cm cada. Os discos foram divididos em quatro pares de cunhas opostas (Figura 2), sendo um par separado para determinação da densidade básica da madeira (cunhas A e A'); um segundo par foi utilizado no preparo de amostras para realização das análises químicas, térmicas e energéticas (cunhas B e B') e os dois últimos pares de cunhas opostas foram carbonizados (cunhas C e C'; D e D').



Figura 2 Ilustração da retirada dos toretes e dos discos para análises

### 3.3 Preparo das amostras de madeira para análises

O esquema geral de preparo das amostras para determinação da densidade básica, análise química e térmica está exposto na Figura 3.

As cunhas (destinadas para análises químicas, térmicas e energéticas) foram cavaqueadas, secas ao ar livre, moídas em moinho tipo Willey, homogeneizadas para obtenção de uma amostra representativa. Posteriormente as amostras foram classificadas a partir de um conjunto de peneiras de 40 a 200

mesh. As amostras retidas na peneira de 40 mesh foram utilizadas na determinação do teor de cinzas da madeira, já as amostras que passaram pela peneira de 40 mesh e ficaram retidas na peneira de 60 mesh foram utilizadas para realização das análises de extrativos e lignina, e por fim, as amostras que passaram na peneira de 60 mesh e ficaram retidas na peneira de 200 mesh foram utilizadas nas análises térmicas (TG e DSC), poder calorífico e infravermelho. Todas as análises experimentais foram realizadas em duplicata.

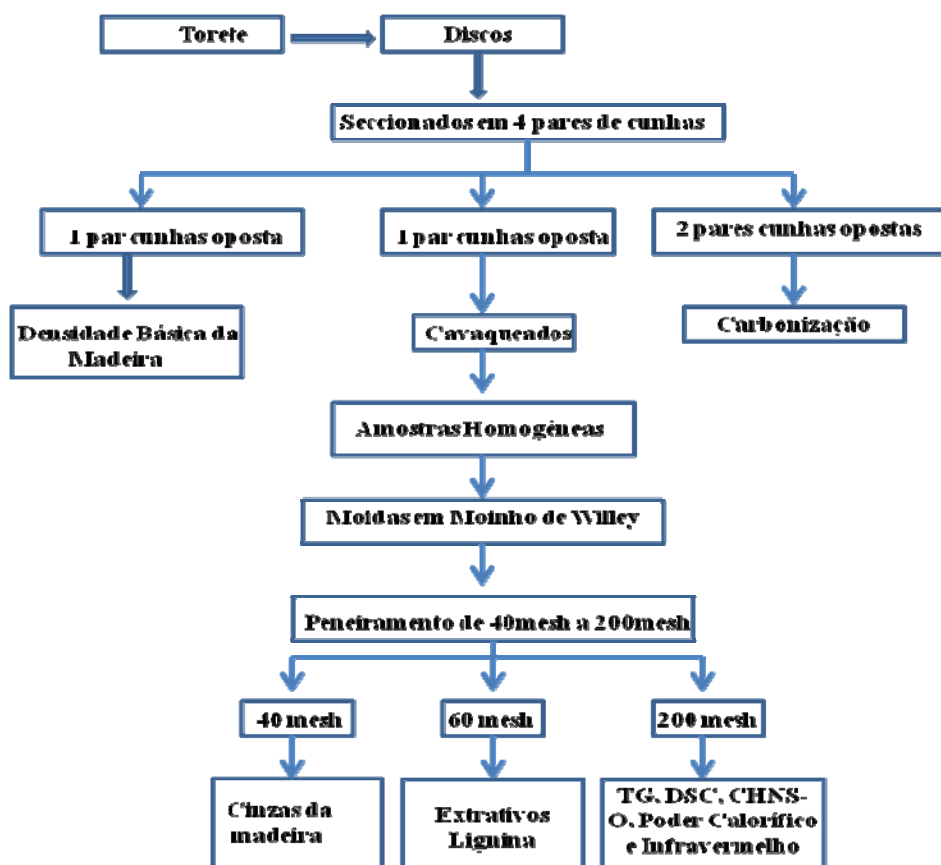


Figura 3 Esquema do preparo das amostras para as análises químicas, físicas e térmicas.



### **3.4 Densidade Básica da Madeira.**

Na determinação da densidade básica da madeira foi utilizando o método de imersão segundo a Norma NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003).

### **3.5 Análise Química da Madeira**

As análises químicas foram realizadas para determinar o teor de lignina Klason, extrativos totais e cinzas. O teor de lignina Klason foi determinado de acordo com o procedimento descrito por Gomide e Demuner (1986). A determinação do teor extrativos totais foi realizada conforme a Norma M 3/89 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP, 1974). A quantificação das cinzas ou minerais foi obtida conforme a Norma M 11/77 (ABTCP, 1974). E o teor de holocelulose foi determinado por diferença.

### **3.6 Análise térmica da madeira**

Para a análise térmica da madeira foi utilizada amostras preparadas conforme descrito anteriormente. Nestas análises foram utilizadas uma amostra por espécie.

As análises térmicas (TG e DTG) foram realizadas em um aparelho Shimadzu-DTG 60AH. Foram utilizados 5mg de cada amostra, estas foram submetidas a uma taxa de aquecimento de  $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ , a uma temperatura inicial de  $30^{\circ}\text{C}$  até a temperatura final de  $800^{\circ}\text{C}$ , sob o fluxo de nitrogênio.

As análises de DSC foram realizadas em um aparelho Shimadzu DSC 60A. No DSC foi utilizada a mesma massa, taxa de aquecimento e fluxo de nitrogênio do TG, porém a temperatura final foi de 500°C.

### **3.7 Infravermelho (FTIR)**

Os espectros na região do infravermelho das amostras de madeira foram obtidos em um espectrofotômetro Digilab série Excalibur, resolução de 4 cm<sup>-1</sup> com 8 acumulações. As amostras foram preparadas em forma de pastilhas utilizando KBr, aproximadamente 10 mg de material e 90 mg de Kbr. Foi utilizada uma amostra representativa de cada espécie.

### **3.8 Carbonização da madeira**

Para carbonização foram retirados discos a 1 metro de altura da base das árvores. Os discos foram subdivididos em quatro pares de cunhas, sendo utilizadas dois pares cunhas opostas para carbonização. Foram carbonizadas quatro árvores por espécie.

As cunhas utilizadas foram previamente secas em estufa a 105 ± 3 °C até massa constante. Em seguida as amostras foram carbonizadas em forno elétrico tipo mufla (Figura 4) a uma taxa de aquecimento de 1,67°C/min, com a temperatura final de carbonização de 450°C, permanecendo por 30 minutos nesta temperatura. Posterior a carbonização, foi determinado o rendimento gravimétrico e a densidade relativa aparente do carvão.

O rendimento gravimétrico expressa a quantidade de carvão produzido por unidade de peso de madeira, ou seja:

$$RGC = \frac{MCS}{MMS} * 100$$

Onde:

RGC = Rendimento Gravimétrico da Carbonização (%);

MCS = Massa do Carvão Seco (g);

MMS = Massa da Madeira Seca (g).

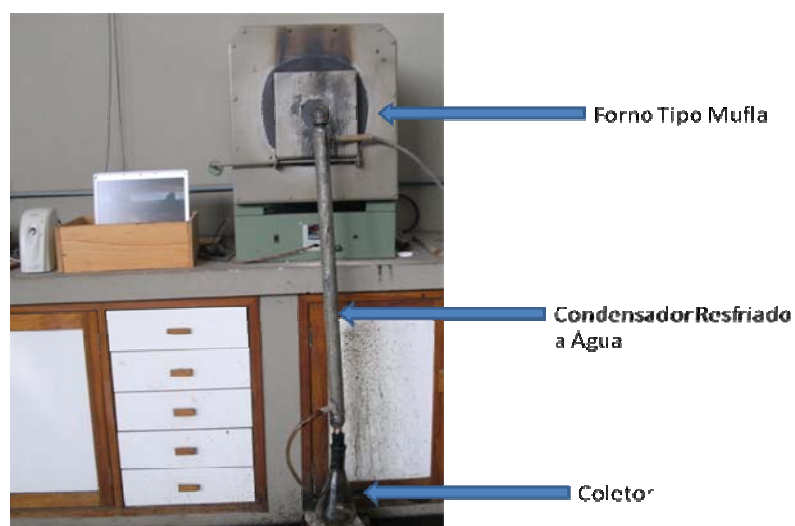


Figura 4 Equipamento usado para carbonizar a madeira

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada através do método de imersão em água, seguindo a Norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

### **3.9 Preparo das amostras para análises do carvão**

O esquema do preparo das amostras de carvão para determinação da densidade relativa aparente, análise química imediata, poder calorífico e CHNS-O está mostrado na Figura 5.

Após a carbonização e determinação do rendimento gravimétrico, os carvões foram moídas em moinho tipo Willey, homogeneizadas para obtenção de uma amostra representativa. Posteriormente as amostras foram classificadas a partir de um conjunto de peneiras de 40 a 200 mesh. As amostras que passaram pela peneira de 40 mesh e ficaram retidas na peneira de 60 mesh foram utilizadas para realização da análise química imediata do carvão, já as amostras que passaram na peneira de 60 mesh e ficaram retidas na peneira de 200 mesh foram utilizadas na determinação do poder calorífico superior e análise química elementar (CHNS-O). Todas as análises experimentais foram realizadas em duplicata.

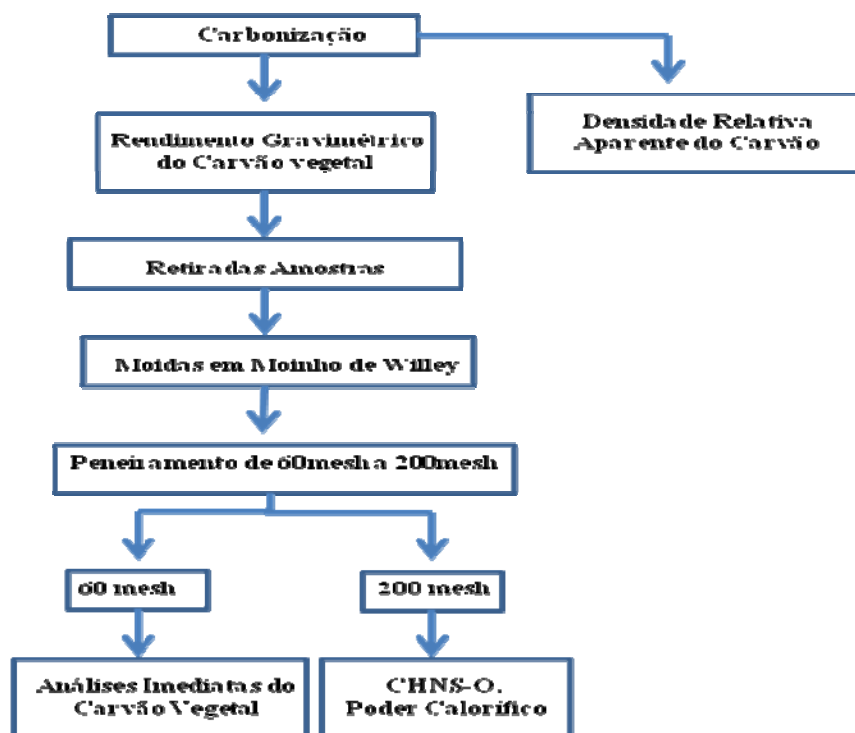


Figura 5 Esquema do preparo das amostras de carvão para as análises químicas imediata, poder calorífico e CHNS-O.

### 3.10 Análise química imediata do carvão

A análise química imediata do carvão foi utilizada para determinar o teor de materiais voláteis, cinzas e de carbono fixo. Esta análise foi realizada segundo a Norma NBR 8112 (ABNT, 1983).

### 3.11 Análise dos componentes elementares (CHNS-O)

A madeira e o carvão vegetal foram previamente preparados como descrito anteriormente (Figura 3 e 5). As amostras foram secas em estufa a  $103 \pm 2$  °C por 24 horas (madeira) e 2 horas (carvão). Em seguida, foram pesadas entorno de 2 mg das amostras e levadas a um analisador elementar Thermo Electron CHNS-O, no qual as amostras representativas de madeira e do carvão vegetal foram analisadas quanto aos teores de C, H, N e por diferença o valor de O.

### 3.12 Poder calorífico superior

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS) foi utilizado o calorímetro digital da marca IKA ® C-200, segundo a norma NBR 08633 (ABNT, 1984). Nesta análise foi determinada a quantidade de energia em calorias (cal) liberada pela queima total de 1 g de madeira e do carvão vegetal.

### 3.13 Análise estatística

Para análise estatística foi utilizado delineamento inteiramente casualizado (DIC), conforme o seguinte modelo estatístico:

$$X_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Onde:

$\mu$ : média geral;

$\tau_i$  : efeito do i-ésimo tratamento (espécie);

$\varepsilon_{ij}$  : erro aleatório  $\varepsilon_{ij} \sim N(0; \sigma^2)$ .

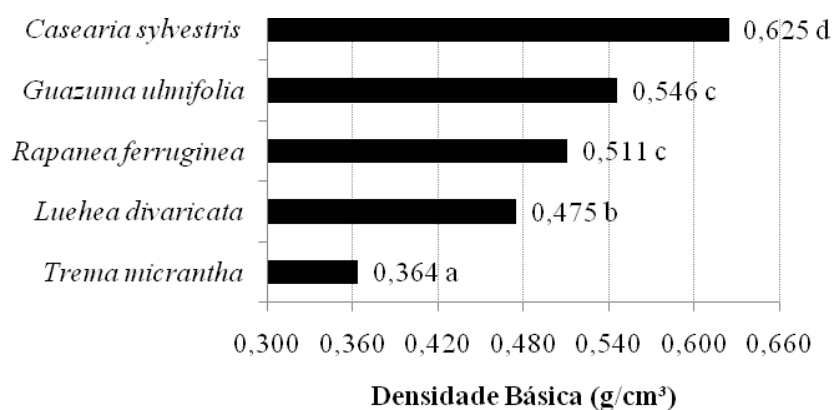
Para a comparação múltipla foi utilizado o teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. A análise estatística foi realizada nos *softwares* estatísticos SISVAR (FERREIRA, 2008) e R versão 2.11.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2005), pacote *agricolae* (MENDIBURU, 2010).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Densidade básica**

Na Figura 6 encontram-se os valores médios de densidade básica da madeira para as espécies avaliadas, bem como o teste de comparação múltipla realizado.

A análise de variância (Anexo I) mostra que o efeito da espécie foi significativo a 5% de probabilidade para a característica DB (densidade básica) e o coeficiente de variância (CV) de 4,99% mostrou que os dados estão precisos.



Valores médios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Figura 6 Valores médios de densidade básica seguido do teste de comparação múltipla.

A densidade básica das espécies em estudo variou de 0,364 g/cm<sup>3</sup> a 0,625 g/cm<sup>3</sup>, sendo a espécie *Casearia sylvestris* a que apresentou a maior densidade básica média e a espécie *Trema micrantha* a menor. Segundo Burger e Richter (1991), a densidade básica da madeira varia de 0,13 a 1,4 g/cm<sup>3</sup>. O Forest Products Laboratory (1955) classifica as madeiras quanto à densidade em: leve (0,30-0,36 g/cm<sup>3</sup>), moderadamente pesada (0,42-0,50 g/cm<sup>3</sup>), pesada ou densa (0,50-0,60 g/cm<sup>3</sup>) e muito pesada (0,60-0,72 g/cm<sup>3</sup>). De acordo com essa classificação a espécie *Casearia sylvestris* é considerada uma madeira muito pesada ou densa, a *Guazuma ulmifolia* e a *Rapanea ferruginea* são pesada, a *Luehea divaricata* possui madeira moderadamente pesada, enquanto a *Trema micrantha* é considerada leve. Vale, Brasil e Leão (2002), estudando a qualidade de madeiras do cerrado para fins energético, encontrou variação da densidade básica da madeira de 0,20 g/cm<sup>3</sup> a 0,78 g/cm<sup>3</sup>.



Oliveira et al. (2006), estudando a estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd) Poir, espécie nativa da Caatinga, obteve valor de 0,91 g/cm<sup>3</sup> de densidade básica da madeira e 0,51g/cm<sup>3</sup> de densidade relativa aparente do carvão proveniente desta madeira, sendo esta considerada como uma madeira extremamente pesada.

Pereira e Lavoranti (1986), comparando a qualidade da madeira de três procedências de *Mimosa scabrella* em Santa Catarina para fins energéticos encontrou densidade básica média de 0,537 g/cm<sup>3</sup>. Estes autores, após a avaliação da densidade juntamente com outras características como o teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico do carvão, afirmaram que esta espécie mostrou-se de boa qualidade para a produção de energia.

A densidade é uma propriedade física que influi diretamente na qualidade da madeira e do carvão. Existe uma alta correlação entre densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal e quanto mais denso o carvão, maior é a quantidade de energia por unidade de volume, menor o custo de colheita e transporte e maior a capacidade de produção dos fornos na indústria (BRITO; BARRICHELO, 1980; CARNEIRO, 2010; CARVÃO..., 2003). Segundo Pereira e Lavoranti (1986) o uso de madeiras com baixa densidade para a produção direta de energia na forma de calor implica em uma queima rápida e numa menor produção de energia por unidade de volume ao contrário de madeiras com maiores densidades.

## **4.2 Análise química da madeira**

A composição química da madeira influi diretamente nas características físico-químicas do carvão vegetal. O comportamento da madeira perante o processo de carbonização é representado pelo somatório do comportamento

isolado dos principais componentes da madeira que são a celulose, hemiceluloses e lignina (BRAGA, 1992). Sendo a lignina o componente de maior influencia na produção e qualidade do carvão.

Os resultados médios dos teores de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e cinzas das espécies em estudo estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 Valores médios dos teores de extrativos (Ext), lignina (lig), holocelulose (holo) e cinzas (Cz) da madeira seguida do Teste de Média de Scott-Knott.

Tratamentos	Valores médios			
	Ext n.s	Lig *	Holo *	Cz n.s
<i>Casearia sylvestris</i>	6,087	26,87 a	65,12 a	1,918
<i>Guazuma ulmifolia</i>	7,763	23,59 a	67,11 a	1,532
<i>Rapanea ferruginea</i>	5,256	19,88 a	73,18 b	1,690
<i>Trema micrantha</i>	5,784	22,68 a	69,61 a	1,918
<i>Luehea divaricata</i>	6,41	23,55 a	68,11a	1,926

\*Característica significativa a 5% de probabilidade pelo Teste de Scott-Knott  
ns- características não significativas a 5% de probabilidade. Valores médios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se que a espécie *Casearia sylvestris* apresentou o maior teor de lignina e menor de holocelulose, enquanto que a espécie *Rapanea ferruginea* apresentou resultado inverso. Observa-se que quanto maior o conteúdo de lignina menor será o teor de holocelulose o que também foi verificado por Santos et al. (2008) em experimento com cinco espécies do Cerrado. Os autores encontraram valores variando de 25,16 % a 32,31% para o teor de lignina e 74,84% a 67,69% para a holocelulose das espécies *Dalbergia miscolobium* e *Vochysia thyrsoidea*, respectivamente. Morais et al. (1999) estudando o conteúdo de polifenóis e lignina da madeira do Cerrado *Astronium urundiuva*, verificou a existência de 23,85 % de lignina e 63 % de holocelulose. Trugilho et al. (1991), em seu trabalho sobre características de espécies nativas e exóticas Amazônicas e do

carvão vegetal, observou variação de 17,94% a 35,21% no conteúdo de lignina entre as doze espécies em estudo. De acordo com Andrade (1993) quando uma madeira com alto teor de lignina é carbonizada o carvão vegetal oriundo desta madeira terá elevado rendimento. Portanto, a lignina possui relação direta com a qualidade do carvão. Segundo Brito e Barrichelo (1977), em trabalho sobre o comportamento isolado da lignina e da celulose da madeira de *Eucalyptus spp.* frente à carbonização, observou que a celulose da madeira degrada rapidamente, assim contribui pouco no teor de carbono fixo do carvão. Já a lignina pela sua maior estabilidade, consegue suportar os níveis da carbonização que irão permitir a concentração de carbono fixo no carvão e maior rendimento gravimétrico. Isso pode ser avaliando os resultados de rendimento gravimétrico da espécie *Casearia sylvestris* que obteve maior teor de lignina e um dos maiores rendimento gravimétrico.

Observa-se na Tabela 1 que o efeito da espécie foi significativo a 5 % de probabilidade para o parâmetro lignina segundo o Teste de Scott-Knott. A análise de variância mostrou o coeficiente de variação de 10,23%.

Analisando os resultados de extrativos observa-se que a *Guazuma ulmifolia* foi à espécie que apresentou o maior conteúdo de extrativos, enquanto a *Rapanea ferruginea* apresentou o menor teor entre as espécies. Vale, Dias e Santana (2010), estudando as relações entre as propriedades químicas, físicas e energéticas de madeiras do Cerrado, observou variação de 25,16% a 31,42% no teor de lignina, já o teor de extrativos variou de 6,14% a 8,54%. Segundo Arantes (2009) o alto teor de extrativos na madeira contribui para um maior poder calorífico. Pastore, Okino e Pastore Júnior (1989), estudando 20 espécies nativas da Amazônia, encontrou correlação positiva e significativa entre o teor de lignina mais extrativos e rendimento em carvão vegetal. Já Santos (2008) não verificou correlação entre o teor de extrativos e o rendimento em carvão vegetal.

O teor de minerais ou cinzas da madeira, corresponde, em geral, a menos de 1% da base de madeira absolutamente seca. Todas as espécies em estudo apresentaram valores maiores que 1% de cinzas. As espécies *Luehea divaricata* e a *Guazuma ulmifolia* foram as que apresentaram o maior e o menor teor de cinzas, respectivamente. Vale, Brasil e Leão (2002), estudando 47 espécies do Cerrado, encontrou variação de 0,15% a 2,73% de cinzas dentre as espécies. Já Trugilho et al. (1991), estudando espécies nativas e exóticas da Amazônia, obteve variação de 0,15% a 1,2% de cinzas na madeira. Altos teores de cinzas podem ter várias origens, como a quantidade variável de lenho juvenil e de lenho tardio presentes na amostragem utilizada (BARCELLOS et al., 2005).

O efeito espécie não foi significativo a 5% de probabilidade para os teores de extrativos e cinzas, porém foi significativo para o teor de lignina e holocelulose.

### 4.3 Análise térmica

A madeira quando é submetida a altas temperaturas, sofre decomposição térmica dos seus componentes químicos (hemiceluloses, celulose e lignina), passando por um processo de carbonização. Os constituintes químicos da madeira se decompõem em distintas faixas de temperatura. A degradação das hemiceluloses ocorre entre 200 e 300°C, a celulose entre 240 e 350°C e a lignina entre 350 e 500°C (BRADBURY; SAKAI; SHAFIZADEH, 1979; CONESA et al., 1995).

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados médios de perda de massa das cinco espécies em estudo através da análise termogravimétrica, em intervalos de temperatura de 30-200°C, de 200-380°C, 380-500°C e de 500-800°C.

Tabela 2 Valores médios da perda de massa (TG) em diferentes intervalos de temperaturas.

Espécie	TG%				Resíduo
	30-200°C	200-380°C	380-500°C	500-800°C	800°C
<i>C. sylvestris</i>	7,828	63,131	5,303	6,818	16,919
<i>L. divaricata</i>	9,057	45,165	26,805	14,320	14,320
<i>R. ferruginea</i>	7,272	68,181	5,454	4,545	14,318
<i>G. ulmifolia</i>	7,709	66,079	4,680	5,231	16,299
<i>T. micrantha</i>	7,407	65,740	5,555	9,027	12,268

Observa-se que as maiores perdas de massa ocorreram na faixa de 200 a 380°C. Esta faixa de temperatura corresponde à degradação das hemiceluloses, celuloses e mais lentamente de lignina. Há quatro fases envolvidas na pirólise de material celulósico oriundo da biomassa, até 150°C ocorre à perda de água, na faixa entre 230-260°C, pode ser observado o início da decomposição dos açúcares (principalmente hemiceluloses), acompanhado da perda de gases como monóxido e dióxido de carbono e líquido leves, como ácido acético e metanol e entre 240-400°C ocorre a intensa cisão das cadeias poliméricas (despolimerização) da celulose, acompanhada do início da decomposição da lignina, sendo a decomposição da celulose o processo dominante nessa etapa (ANTAL; MORTEN, 2003; ÓRFÃO; FIGUEIREDO, 2001).

Analisando os valores de perda de massa verifica-se que a espécie *Rapanea ferruginea* foi a que apresentou maior perda de massa na faixa de temperatura entre 200-380°C, isso pode ser justificado pelo alto teor de holocelulose encontrado nesta espécie. A partir de 380°C a perda de massa é mais lenta, pois a decomposição da lignina remanescente é observada acima de 400°C (SYRED et al., 2006). Dalben et al. (2006), estudando a pirólise a vácuo da aroeira (espécie nativa do Cerrado) observou que as amostras que foram tratadas a 230°C no vácuo apresentaram grande redução de massa na faixa de temperatura entre 200-400°C seguida de mais duas rampas de perda de massa uma até 600°C e

uma outra rampa que perdurou até 1000°C. Segundo estes autores a primeira perda corresponde à degradação das hemiceluloses e celulose e as rampas de perda acima de 400°C são provenientes da degradação da lignina. Shebani et al. (2008), estudando o efeito dos extrativos da madeira sobre a estabilidade térmica de diferentes espécies de madeira (*Quecus Alba*, *Pinus radiata*, *Eucalyptus grandis* e *Acacia cyclops*), verificou perda de massa a 100°C (pode ser atribuída a evaporação da água), houve uma perda de massa gradual a 200°C e uma grande perda de massa entre 200-400°C, sendo que as quatro espécies apresentaram perda de aproximadamente 75% de massa a 400°C. Segundo estes autores a perda entre 200-400°C ocorreu em duas etapas, a primeira entre 28-260°C atribuída a decomposição das hemiceluloses e mais lentamente da lignina, e a segunda etapa acima de 350°C foi atribuída a decomposição da celulose. Kim et al. (2006), confirmou que a degradação das hemiceluloses ocorre entre 180-350°C, a lignina entre 250-500°C e a celulose entre 275-350°C.

Pode-se observar que a *Casearia sylvestris* e *Guazuma ulmifolia* foram as espécies que apresentam os maiores porcentagem de massa residual a 800°C (16,919% e 16,299%, respectivamente) e também possuem os maiores conteúdos de lignina, sendo, portanto, consideradas madeiras mais estáveis (SHEBANI et al., 2008). Isso porque a lignina é o componente mais resistente termicamente quando comparado com os demais constituintes químicos da madeira. A perda de massa das hemiceluloses a 600°C pode passar de 95%, no caso da celulose esta perda pode chegar a mais de 80%, enquanto as perdas em massa de lignina não excede 60% nesta temperatura (BARTKOWIAK; ZAKRZEWSKI, 2004; KASTANAKI et al., 2002).

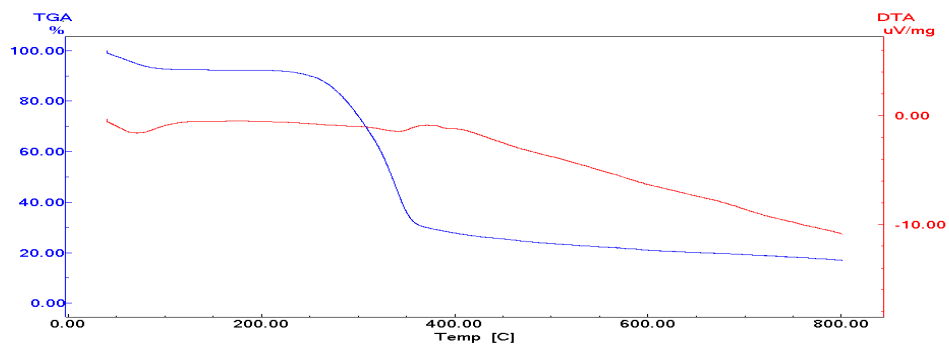
O comportamento termogravimétrico foi semelhante entre as espécies, com exceção da *Luehea divaricata*, que apresentou baixa perda de massa a 200-380°C, isso significa que essa espécie apresenta alta estabilidade térmica nesta

faixa de temperatura. Entre as temperaturas de 380-500°C-800°C a *Luehea divaricata* apresentou as maiores perdas de massa entre as espécies.

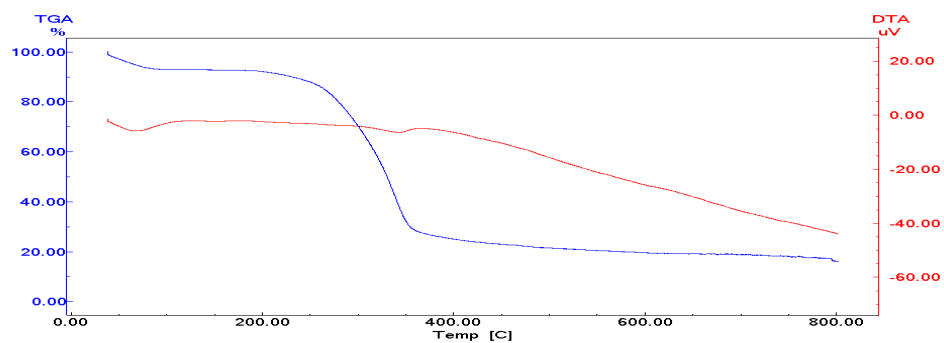
As Figura 7 e 8 mostram as análises termogravimétricas (TG) e análises térmicas diferenciais (DTA) das cinco espécies em estudo. Na análise térmica diferencial (DTA) mede-se a variação de energia envolvida no sistema durante a perda de massa. Os picos positivos significam que houve reação exotérmica ou de liberação de energia, enquanto os picos negativos demonstram que houve reação endotérmica ou de absorção de energia.

Pode-se observar que a primeira fase de perda de massa ocorreu a aproximadamente a 120°C, associada ao pico endotérmico e corresponde à perda de água (MENDHAM et al., 2000). Este comportamento foi semelhante em todas as espécies. Após a aproximadamente 120°C a curva termogravimétrica permanece constante até 200°C, a partir desta temperatura inicia-se a decomposição da madeira.

Observa-se através das curvas de perda de massa e DTA que em todas as espécies ocorrem reações exotérmica na temperatura de aproximadamente 380°C, o que coincide com a temperatura de maior perda de massa em todas as espécies. Isso também pode ser observado nas curvas de DSC (Calorimetria Exploratória Diferencial) na Figura 9 e 10. A espécie *Luehea divaricata* foi à única que apresentou um pico endotérmico a aproximadamente a 650°C.

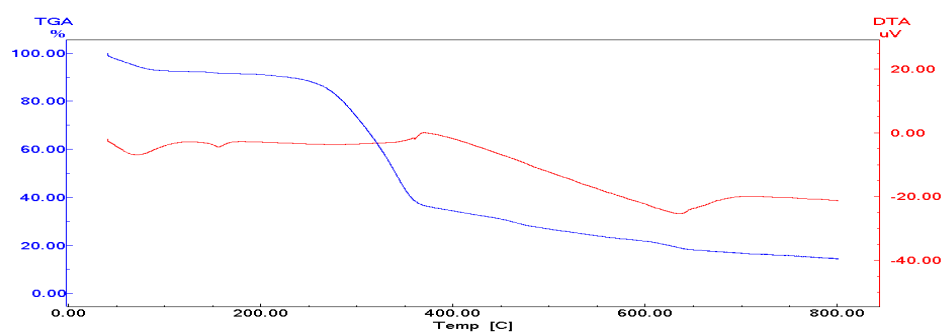


a) *Casearia sylvestris*



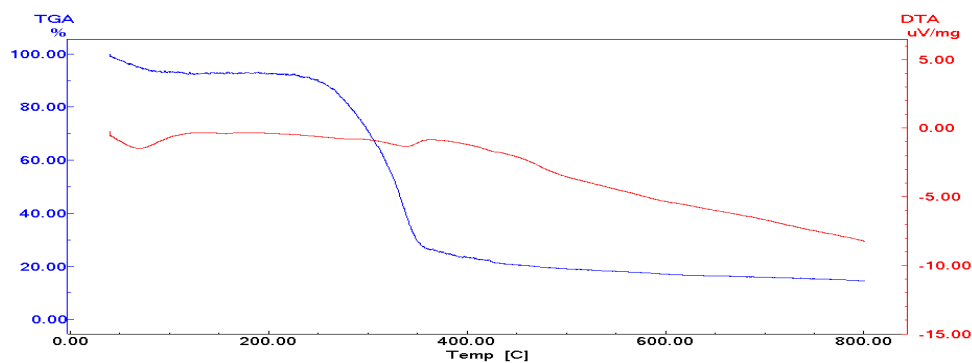
b) *Guazuma ulmifolia*

Figura 7 Curvas de perda de massa ou termogravimetria (TG) e picos das reações envolvidas na análise térmica diferencial (DTA) das espécies: a) *Casearia sylvestris*, b) *Guazuma ulmifolia*

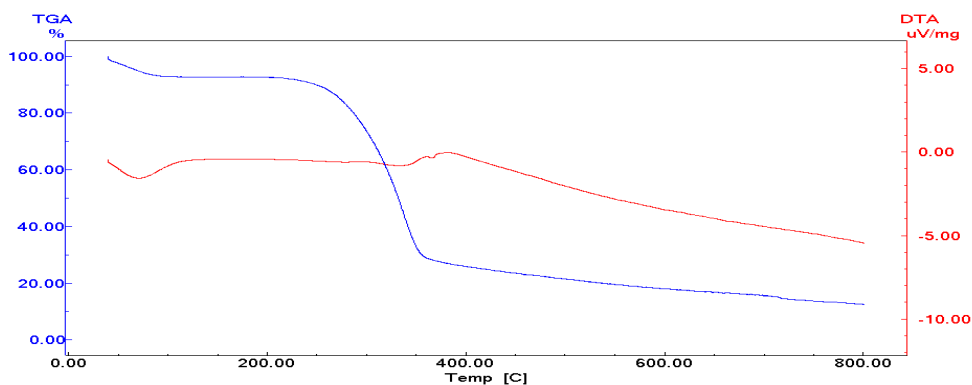


a) *Luehea divaricata*





*b) Rapanea ferruginea*

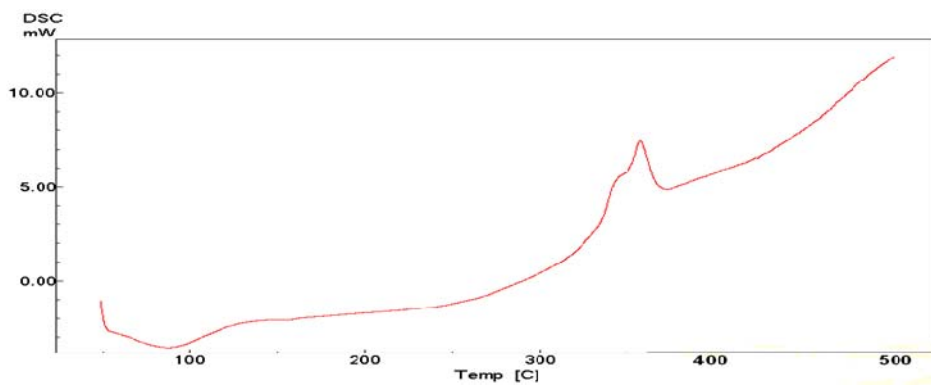


*c) Trema micrantha*

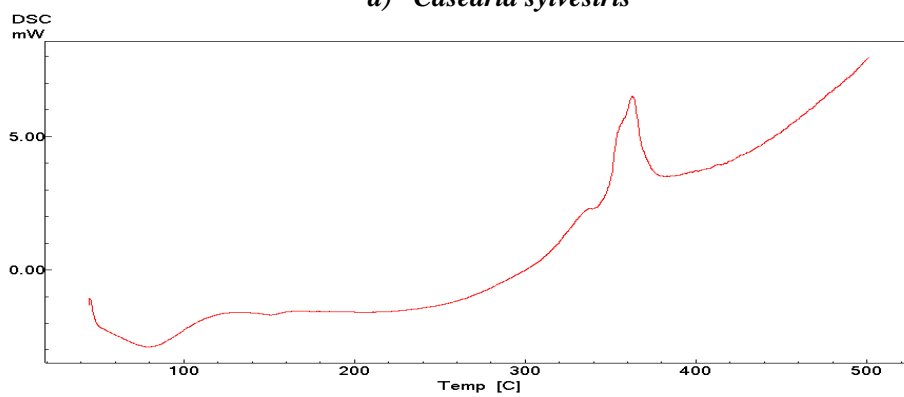
Figura 8 Curvas de perda de massa ou termogravimetria (TG) e picos das reações envolvidas na análise térmica diferencial (DTA) das espécies: a) *Luehea divaricata*, b) *Rapanea ferruginea* e c) *Trema micrantha*.

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) mede a quantidade de energia fornecida ou absorvida durante a decomposição de uma substância em um programa controlado de temperatura. Os picos endotérmicos (de absorção de energia) são atribuídos a desidratação do material, enquanto os picos exotérmicos (liberação de energia) correspondem à oxidação da matéria orgânica, todos em concordância com as perdas de massa observada pelo TG (MENDHAM et al.,

2000). As curvas de DSC da madeira das espécies estudadas encontram-se na Figura 9 e 10.

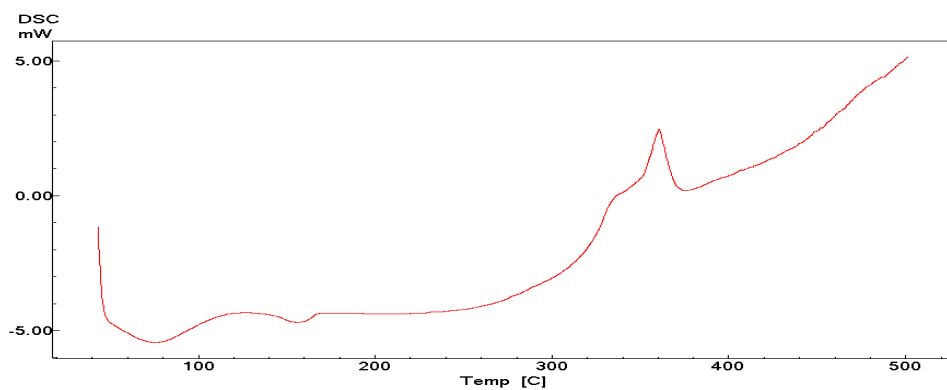


**a) *Casearia sylvestris***

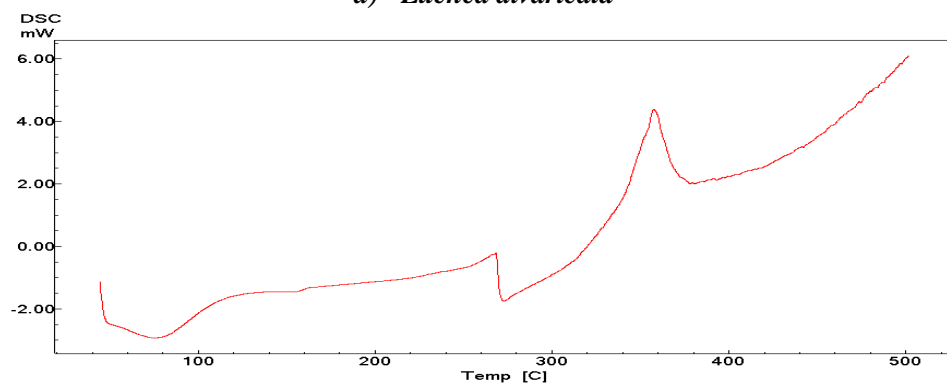


**b) *Guazuma ulmifolia***

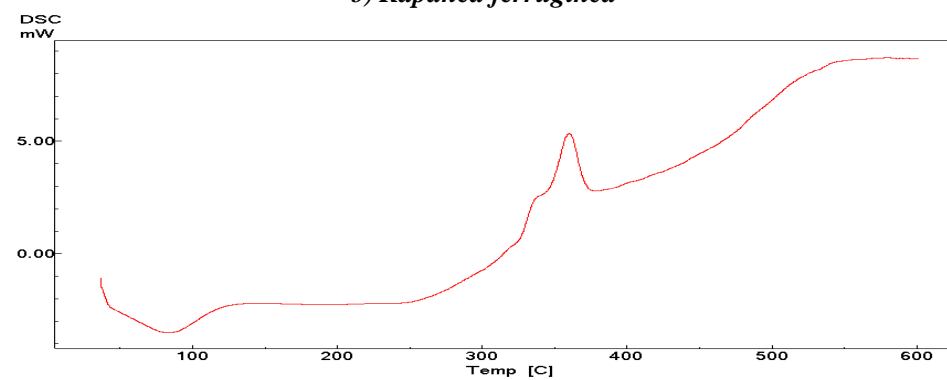
Figura 9 Curvas de DSC das cinco espécies em estudo: a) *Casearia sylvestris*, b) *Guazuma ulmifolia*



a) *Luehea divaricata*



b) *Rapanea ferruginea*



e) *Trema micrantha*

Figura 10 Curvas de DSC das cinco espécies em estudo: a) *Luehea divaricata*  
b) *Rapanea ferruginea* e c) *Trema micrantha*

Pode-se observar que as espécies apresentaram comportamento semelhante quanto às curvas de DSC. Analisando as curvas de degradação térmica das madeiras verifica-se um pico endotérmico a aproximadamente 80°C para todas as espécies. Posteriormente, observa-se uma fase de reações exotérmicas entre 330-380°C, o que coincide com os picos de perda de massa nas curvas termogravimétricas (Figura 7 e 8). Tsujiyama e Miyamori (2000) afirmam que as análises térmicas da madeira fazem surgir dois picos, o primeiro é endotérmico, atribuído à decomposição da celulose, e o segundo é exotérmico, que corresponde à decomposição da lignina.

Além do pico endotérmico a 80°C a espécie *Luehea divaricata* apresentou um segundo pico endotérmico a 160°C e a *Rapanea ferruginea* apresentou o um segundo pico endotérmico a 260°C. Esses picos não aparecem nas curvas de perda de massa. De acordo com Lelles, Silva e Silva (1996), em estudo sobre a caracterização do carvão vegetal produzido a partir da madeira *Acacia mangiu*, a madeira dessa espécie quando aquecida apresenta picos endotérmicos a temperaturas de 110°C, 150°C e aproximadamente 350°C. Além disso, a curva de DSC da madeira em estudo mostra picos exotérmicos a 275°C, 360°C e 450°C. Já Tsujiyama e Miyamori (2000), estudando termogramas de DSC da madeira de *Pinus spp.* e de seus componentes, encontraram três picos exotérmicos, um a 340°C, um segundo pico a 475°C e um pequeno pico a 450°C.

A primeira fase de degradação térmica da madeira é endotérmica e ocorre entre 25 e 200°C, esta fase é atribuída ao consumo de energia necessária à sua secagem. Nesta fase a quantidade de energia consumida vai depender da quantidade de água contida no material. Dentre as espécies em estudo a *Trema micrantha* foi a que consumiu mais energia no processo de secagem, cerca de 43,52 cal/g e a *Rapanea ferruginea* foi a que consumiu menos energia cerca de 21,82 cal/g no primeiro pico endotérmico e 29,90 cal/g no segundo pico. A *Luehea divaricata* absorveu cerca de 4,42 cal/g no seu segundo pico

endotérmico. A segunda fase da degradação térmica corresponde ao calor de formação dos produtos gasosos liberados pelo processo de pirólise (LELLES; SILVA; SILVA, 1996). As reações exotérmicas que ocorreram entre 330-380°C liberaram aproximadamente de 30-40cal/g de energia.

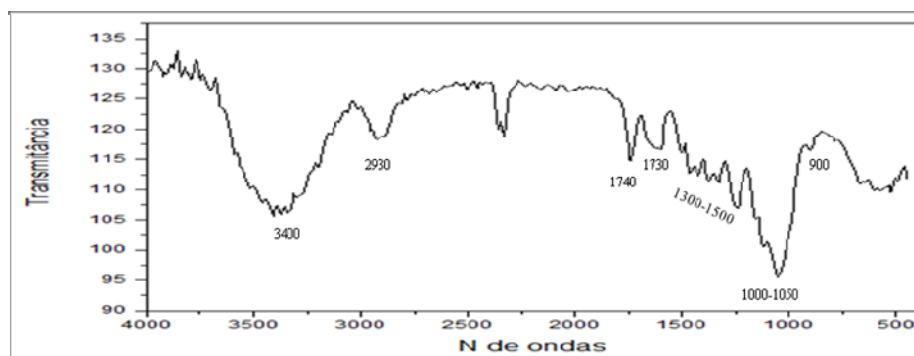
#### 4.4 Análise de infravermelho

A Figura 11 e 12 mostra os espectros na região do infravermelho das amostras de madeira. Os espectros não se diferenciam significativamente. Podem-se observar bandas na região de  $3400\text{ cm}^{-1}$  referentes a grupos OH, bandas em aproximadamente  $2930\text{ cm}^{-1}$  atribuída a estiramento vibracional simétrico e assimétrico de grupos  $\text{CH}_2$ .

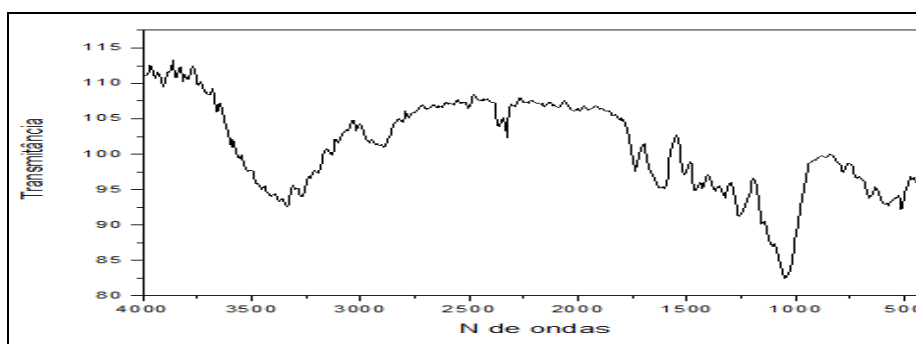
As bandas em  $1730\text{-}1740\text{ cm}^{-1}$  correspondente a estiramento axial de grupos carboxílicos da estrutura da lignina. Em  $1000\text{-}1050\text{ cm}^{-1}$  as bandas são atribuídas aos estiramentos do grupo C-O da celulose, hemiceluloses e lignina ou C-O-C da celulose e hemiceluloses.

As bandas na região entre em  $1500$  e  $1300\text{ cm}^{-1}$  estão relacionadas às vibrações do anel aromático (HERGERT, 1971).

Em aproximadamente  $900\text{ cm}^{-1}$  observa-se o aparecimento de uma banda com baixa intensidade, que está relacionada à celulose. As bandas observadas abaixo de  $1000\text{ cm}^{-1}$  são, geralmente, associadas à absorção de grupos hidroxílicos da celulose (CASTRO, 2003).

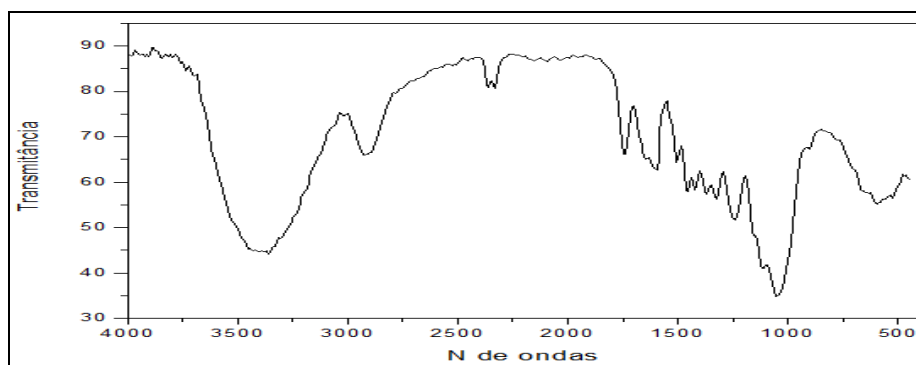


a) *Casearia sylvestris*

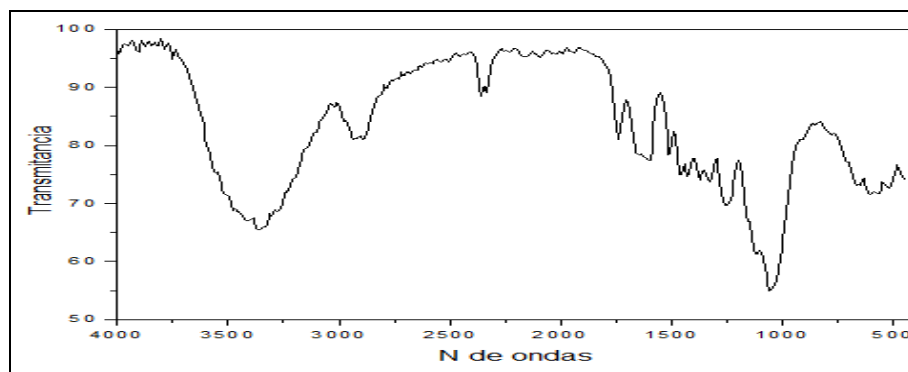


b) *Luehea divaricata*

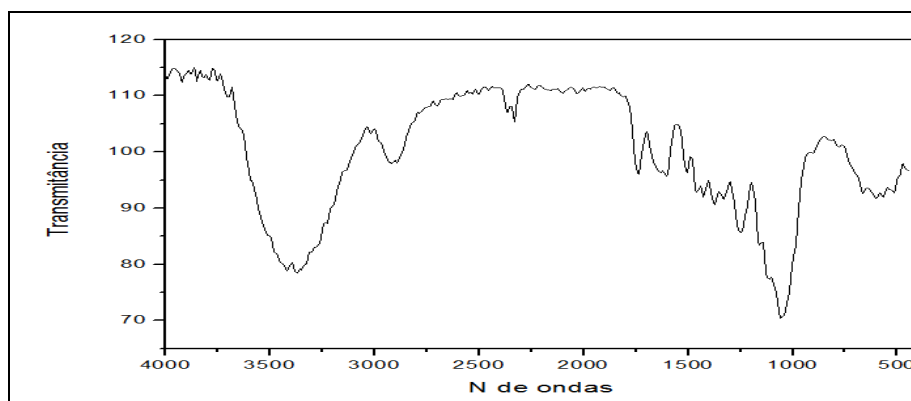
Figura 11 Espectros na região do infravermelho das espécies estudadas: a) *Casearia sylvestris*, b) *Luehea divaricata*



a) *Guazuma ulmifolia*



**b) *Rapanea ferruginea***



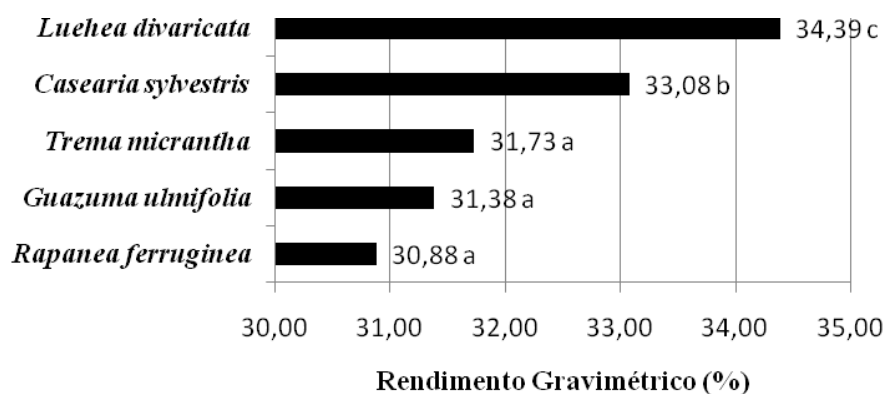
**c) *Trema micrantha***

Figura 12 Espectros na região do infravermelho das espécies estudadas: a) *Luehea divaricata*, b) *Rapanea ferruginea*, c) *Trema micrantha*

#### 4.5 Rendimento Gravimétrico do Carvão Vegetal

O rendimento gravimétrico expressa a quantidade de carvão produzido por unidade de peso de madeira após a carbonização. Os rendimentos gravimétricos do carvão vegetal das espécies em estudo estão mostrados na Figura 13.

Dentre as espécies estudadas a *Luehea divaricata* e a *Rapanea ferruginea* apresentaram o maior e o menor rendimento gravimétrico, respectivamente.



Valores médios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Figura 13 Rendimento Gravimétrico (RG) de carvão das espécies estudadas.

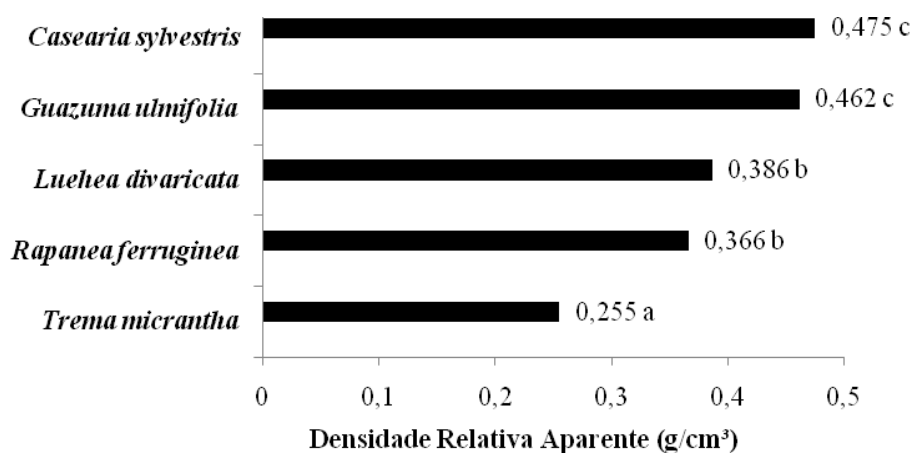
Os valores médios do rendimento gravimétrico das espécies *Trema micrantha*, *Guazuma ulmifolia* e *Rapanea ferruginea*, não diferiram entre si segundo o Teste de comparação múltipla de Scott-Knott. Pela análise de variância (Anexo I) observa-se que o efeito espécie foi significativo a 5% de probabilidade para o rendimento gravimétrico e o coeficiente de variação foi de 1,88 %, sendo considerado baixo.

Oliveira et al. (2006), estudando a estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora*, verificou rendimento de 39,68% de rendimento na carbonização e o coeficiente de variação foi de 2,98%. Já para madeira de *Eucalyptus grandis*, usualmente empregada na produção de carvão vegetal, carbonizada nas mesmas condições, Oliveira (2003) obteve 33,68% de



rendimento gravimétrico em carvão. Resultado semelhante foi encontrado por Brito e Barrichelo (1977), que obteve de 26,2% a 31,3% de rendimento gravimétrico do carvão da madeira de dez espécies de *Eucalyptus spp.*

A densidade relativa aparente do carvão é um parâmetro importante na determinação da qualidade do carvão. Os valores médios da densidade relativa aparente do carvão e o teste de comparação múltipla realizado estão mostrados na Figura 14.



Valores médios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Figura 14 Valores médios da densidade relativa aparente do carvão vegetal seguida do Teste de comparação múltipla.

Avaliando a análise de variância das espécies observou-se que o efeito espécie foi significativo a 5% de probabilidade para a densidade relativa aparente e o coeficiente de variação foi de 8,73% (Anexo I). Observa-se, pelo teste de comparação múltipla, as espécies foram classificadas em três grupos: i) *Casearia sylvestris* e *Guazuma ulmifolia* apresentaram as maiores médias de densidade,

ii) *Rapanea ferruginea* e a *Luehea divaricata* apresentaram valores intermediários e iii) *Trema micrantha* obteve o menor valor de densidade.

A *Casearia sylvestris* foi a espécie que obteve a maior densidade aparente, e também a maior densidade básica da madeira. Já a *Trema micrantha* apresentou menores valores de densidade relativa aparente do carvão e densidade básica da madeira. Conforme Brito e Barrichelo (1980) e Doat e Petroff (1975) existe alta correlação entre densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão. Quanto maior for a densidade da madeira mais denso será o carvão. Oliveira (2003), estudando a estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora*, verificou que esta espécie possui densidade básica da madeira de 0,91 g/cm<sup>3</sup>, sendo considerada uma madeira pesada, e densidade relativa aparente do carvão de 0,51 g/cm<sup>3</sup>. Segundo os autores esta espécie possui bom potencial para produção de carvão vegetal e geração de energia. Santos (2008) observou valores médios de 0,28 a 0,43 g/cm<sup>3</sup> de densidade relativa aparente do carvão de espécies do cerrado. Já Trugilho et al. (2005), estudando clones de *Eucalyptus*, obteve valor médio de 0,311 g/cm<sup>3</sup> de densidade do carvão.

#### **4.6 Análise química imediata do carvão vegetal**

A composição química do carvão vegetal é representada pelos teores de materiais voláteis, teor de minerais ou cinzas e pelo carbono fixo. O resultado médio da análise química imediata dos carvões e o resultado do teste de comparação múltipla encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 Valores médios do teor de materiais voláteis (TMV), teor de carbono fixo (TCF), teor de cinzas no carvão (TCZ), com respectivo teste de comparação múltipla

Espécies	Valores médios		
	TMV	TCF	TCz
<i>Guazuma ulmifolia</i>	14,43 a	81,01a	3,14 a
<i>Luehea divaricata</i>	18,11 a	77,19 a	4,69 b
<i>Casearia sylvestris</i>	17,60 a	77,64 a	4,74 b
<i>Rapanea ferruginea</i>	17,96 a	79,44 a	2,58 a
<i>Trema micrantha</i>	19,76 a	77,85 a	2,37 a

Valores médios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

As espécies apresentaram altos teores de carbono fixo, o que é uma grande vantagem na produção de carvão vegetal. Isso porque, combustíveis com alto índice de carbono fixo devem ter queima mais lenta, implicando maior tempo de residência dentro dos aparelhos de queima, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo (BRITO; BARRICHELLO, 1982).

A espécie que mais se destacou com relação ao teor de carbono fixo foi a *Guazuma ulmifolia* com 81,01% de carbono fixo no carvão e o menor teor de materiais voláteis, já a *Luehea divaricata* apresentou o menor teor de carbono fixo, 77,19%. Cotta (1996), diz que há uma relação entre carbono fixo e teor de materiais voláteis e de cinzas no carvão. Quanto maior o teor de cinzas e de matérias voláteis, menor o teor de carbono fixo. Segundo Penedo (1982), o teor de carbono fixo do carvão vegetal aumenta com o aumento da temperatura final de carbonização o que é seguido pela redução do teor de matérias voláteis. Este autor observou um acréscimo de 75,06% para 89,82% de carbono fixo quando a temperatura de carbonização aumentou de 450°C para 700°C. Trugilho et al. (2005), estudando rendimentos e características do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, obteve média de 69,04% de teor de carbono fixo, 30,78% de

materiais voláteis e 0,32% de teor de cinzas. Diferindo dos resultados encontrados por Botrel et al. (2007), que observou valores médio de 74,25%, 25,50% e 0,25% para teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis e cinzas no carvão proveniente de madeira de *Eucalyptus*.

Foram encontrados altos teores de cinzas no carvão das espécies: *Casearia sylvestris*, *Guazuma ulmifolia* e *Luehea divaricata*, diferindo dos valores encontrados normalmente na literatura. O teor de cinzas é dependente da quantidade de matéria mineral presente na madeira, que não se volatiliza as temperaturas normais de carbonização, ficando toda na cinza do carvão (COTTA, 1996). Vale, Brasil e Leão (2002), estudando madeiras do Cerrado observou variação dos teores de cinzas da madeira entre 0,15% (*Enterolobium gummiferum*) e 2,73% (*Erytroxylum suberosum*). A média de teor de cinzas verificada por Brito e Barrichelo (1977) em estudo com carvão vegetal de *Eucalyptus* foi de 0,5%.

Na Tabela 3, encontram-se os resultados dos testes de comparação múltipla dada pelo teste de Scott-Knott. Observa-se que as médias do teor de materiais voláteis e carbono fixo não diferiram pelo teste de Scott-Knott, na análise de variância estas características foram significativas a 5% de probabilidade (Anexo I). Para os parâmetros teor de cinzas o teste de Scott-Knott indica que houve diferença significativa a 5% para o efeito das espécies.

#### **4.7 CHNSO das amostras de madeira e do carvão vegetal**

Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios dos componentes elementar da madeira e do carvão das cinco espécies em estudo.

Tabela 4 Valores médios dos componentes elementares da madeira e do carvão vegetal: C-carbono, H-Hidrogênio, N-nitrogênio e O- oxigênio.

Espécies	Madeira				Carvão Vegetal			
	%Cns	%Hns	%N*	%Ons	%Cns	%Hns	%Nns	%Ons
<i>C.sylvestris</i>	48,70	6,28	0,32 b	44,70	79,72	3,32	0,40	16,57
<i>L.divaricata</i>	47,40	6,11	0,27 b	46,22	77,72	3,21	0,41	18,66
<i>R. ferruginea</i>	48,27	6,41	0,16 a	45,16	80,69	3,34	0,29	15,68
<i>G. ulmifolia</i>	48,09	6,32	0,20 a	45,39	78,67	3,12	0,30	17,91
<i>T. micrantha</i>	48,43	6,40	0,24 a	44,93	82,07	3,31	0,33	14,28
<b>Média Geral</b>	48,18	6,31	0,24	45,28	79,77	3,26	0,35	16,62
<b>CV%</b>	1,01	1,90	20,25	1,29	2,13	2,92	15,48	10,50

\*Característica significativa a 5% de probabilidade pelo Teste de Scott-Knott  
ns- características não significativas a 5% de probabilidade. Valores médios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Observa-se que houve pouca variação entre as espécies quanto aos teores dos componentes elementares tanto na madeira como no carvão. O teste de médias de Scott-Knott mostra dentre os componentes elementares da madeira e do carvão somente houve diferença significativa a 5% de probabilidade para o teor de nitrogênio.

Comparando-se a composição dos carvões com a madeira precursora observa-se um aumento do teor C e diminuição de H e O. Isso ocorre devido à liberação de compostos voláteis (que contém grandes quantidades de H e O) e a aromatização da estrutura durante o processo de carbonização. Na espécie *Trema micrantha*, por exemplo, pode-se verificar um aumento de aproximadamente 41% no teor de carbono, uma diminuição de 49% e 68% nos teores de hidrogênio e oxigênio.

Observa-se que a *Trema micrantha* apresenta os maiores teores de carbono na madeira e no carvão vegetal 48,43% e 82,07%, respectivamente. Valores semelhantes foram observados por Oliveira et al. (2010), estudando

parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell obteve 48,57% de C, 6,43% de H, 0,17% de N e 44,87% de O. Segundo este autor, observa-se em diferentes trabalhos sobre composição elementar que este parâmetro não tem muita variabilidade entre espécies e também entre gêneros. Penedo (1982) obteve em seu estudo valores médios de 46,9% de carbono, 5,7% de hidrogênio, 0,3 % de nitrogênio e 40,8% de oxigênio. Andrade e Machado (2004), estudando as propriedades termoquímicas dos finos de carvão vegetal de *Eucalyptus* observou valores de 86,285% de C, 2,2325% de H, 1,05% de N e 8,83% de O. São poucos os estudos que contemplam a análise química elementar do carvão vegetal.

#### **4.8 Poder calorífico superior**

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calor liberada na combustão completa de uma unidade de massa de carvão vegetal, expressa em cal/g ou kcal/kg para combustíveis sólidos e líquidos.

Na Tabela 5 encontram-se as médias do poder calorífico superior da madeira e do carvão vegetal das cinco espécies avaliadas.

Tabela 5. Poder Calorífico Superior (PCS) da madeira e do carvão vegetal das cinco espécies estudadas.

Espécies	PCS (kcal/kg)	
	Madeira ns	Carvão*
<i>Casearia sylvestris</i>	4567,25	7356,25 a
<i>Luehea divaricata</i>	4520,63	7135,25 a
<i>Rapanea ferruginea</i>	4473,13	7524,13 b
<i>Guazuma ulmifolia</i>	4511,25	7455,50 b
<i>Trema micrantha</i>	4521,13	7729,88 b
<b>Média Geral</b>	4518,68	7440,20
<b>Desvio Padrão</b>	33,54	218,65
<b>CV%</b>	0,74	2,94

\*Característica significativa a 5% de probabilidade pelo Teste de Scott-Knott.

ns- características não significativas a 5% de probabilidade. Valores médios seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

A *Casearia sylvestris* foi à espécie que obteve o maior poder calorífico da madeira (4567,25kcal/kg), isso deve-se provavelmente aos altos teores de lignina, carbono na madeira e carbono fixo encontrados nesta espécie. Penedo (1982) afirma que existe uma correlação positiva entre o teor de carbono fixo e correlação negativa entre o poder calorífico e o teor de materiais voláteis. Cunha et al. (1989), encontraram poder calorífico superior de 4670 kcal/kg para a espécie *Casearia sylvestris*, diferindo em aproximadamente 100 kcal/kg do PCS encontrado neste trabalho para a referida espécie. O PCS das demais espécies não foram encontrados na literatura para comparação. Entretanto, Vale, Brasil e Leão (2002), estudando 47 espécies arbóreas do Cerrado, verificaram que o PCS variou de 4516 kcal/kg a 4989 kcal/kg, sendo que a espécie *Blepharocalix salicifolius* a que apresentou o menor valor e a *Acosmium dasycarpum* teve o menor PCS. Brito, Barrichelo e Seixas (1983), avaliando a produção energética de nove espécies de *Eucalyptus*, encontraram poder calorífico superior de 5023 kcal/kg

para *Eucalyptus pellita* e 4733 kcal/kg para *Eucalyptus globulus*, sendo esses valores superiores aos relatados neste trabalho para as espécies nativas estudada.

Dentre as espécies a *Trema micrantha* foi a que apresentou o maior poder calorífico no carvão vegetal (7729,88 kcal/kg), e também é a espécie com maior teor de carbono fixo e menor teor de voláteis, estando de acordo com Penedo (1982). Oliveira et al. (2006), encontraram média de 6866 kcal/kg de poder calorífico superior para carvão vegetal de *Mimosa tenuiflora* em seu estudo. A influência da velocidade de carbonização da madeira de *Eucalyptus tereticornis* nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido, encontrou média de poder calorífico do carvão vegetal de 8018 kcal/kg.

## 5 CONCLUSÃO

Entre as espécies a *Casearia sylvestris* foi a que apresentou as melhores características que determinam a qualidade do carvão vegetal, sendo, portanto a espécies com maior potencial para geração de energia.

Apesar da *Trema micrantha* possuir variáveis positivas quanto a qualidade do carvão, esta espécie apresenta baixa densidade básica da madeira e a baixa densidade relativa aparente do carvão vegetal desfavorece a sua utilização na indústria, pois que atrapalharia o processo industrial e de transporte.

A *Guazuma ulmifolia* apresentou diversas características favoráveis para produção de carvão como: alta densidade da madeira e do carvão, altos teores de lignina e carbono fixo, alta estabilidade térmica e baixo teor de cinzas;

Apesar de apresentar alto rendimento gravimétrico a *Luehea divaricata* possui baixo teor de carbono fixo e poder calorífico do carvão, que são grandes desvantagens para produção de carvão;



A *Rapanea ferruginea* não apresentou nenhuma característica favorável para produção de carvão vegetal, porém é uma espécie com alto teor de holocelulose, podendo ser indicada para outros fins, como por exemplo, para produção de papel.

### REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. **Indústrias que usam carvão vegetal do Cerrado terão até 2013 para comprar o produto de áreas reflorestadas.** Disponível em: <<http://www.agrosoft.org.br/agropag/213670.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. **O processo de carbonização contínua da madeira:** produção e utilização do carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 156 p.

ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto.** 1993. 105 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.

\_\_\_\_\_. **Influência da casca de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no rendimento e qualidade de carvão vegetal.** 1989. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1989.

ANDRADE, A. M.; MACHADO, F. S. Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos finos de carvão vegetal e de carvão mineral, para injeção nas ventaneiras de alto-fornos siderúrgicos. **Biomassa e Energia**, Viçosa, MG, v. 1, n. 3, p. 273-279, 2004.

ANTAL, M. J.; MORTEN, G. The art, science, and technology of charcoal production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 42, n. 8, p. 1619-1640, Oct. 2003.

ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex. Maiden X *Eucalyptus urophylla* S.T.Blake.** 2009. 137 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

ASSIS, C. O. et al. Sistema alternativo para carbonização de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 78, p. 133-140, jun. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112:** carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1983. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8633:** carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11941:** madeira: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Extrativos totais, solubilidade em NaOH a 1%, teor de cinzas ou minerais.** São Paulo, 1974.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Anuário estatístico 2009.** Belo Horizonte, 2009.

BARCELLOS, D. C. et al. O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa e Energia**, Viçosa, MG, v. 2, n. 2, p. 114-158, 2005.

BARRICHELO, L. C.; BRITO, J. O. **Química da madeira.** Piracicaba: ESALQ, 1985. 125 p.

BARTKOWIAK, M.; ZAKRZEWSKI, R. Thermal degradation of lignins isolated from wood. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Dordrecht, v. 77, n. 1, p. 296-304, July 2004.

BERNAL, C. et al. Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 5, p. 849-855, set./out. 2002.

BOTREL, M. C. G. et al. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, maio/jun. 2007.

BOZZINI, A. C. Do verde às cinzas: análise das normas jurídicas-ambientais que regulamentam a exploração da madeira do bioma cerrado para a produção de carvão. **Holos Environment**, Rio Claro, v. 3, n. 1, p. 14-16, 2003.

BRADBURY, A. G. W.; SAKAI, Y.; SHAFIZADEH, F. A kinetic model for pyrolysis of cellulose. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 23, p. 3271-3280, 1979.

BRAGA, R. N. B. **Carvão vegetal, produção, propriedades e aplicações na siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1992. 320 p.

BRANCA, C.; BLASI, C. D. Kinetics of the isothermal degradation of wood in the temperature range 528-708 K. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 67, n. 2, p. 207-219, May 2003.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2010. 59 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Informe nacional sobre áreas protegidas**. Brasília, 2007. 12 p.

\_\_\_\_\_. **PPCERRADO**: plano de ação para prevenção e controle do desmatamento no cerrado. Brasília, 2010. 152 p.

BRITO, J. O. **Princípio de produção e utilização de carvão vegetal de madeira**. Piracicaba: IPEF, 1990. 19 p. (Documentos Florestais, 9).

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1982. p. 101-137.

\_\_\_\_\_. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I., densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.

\_\_\_\_\_. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: II., densidade da madeira X densidade do carvão. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 20, p. 121-126, jun. 1980.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; SEIXAS, F. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 23, p. 53-56, 1983.

BROWN, M. E. **Introduction to thermal analysis: techniques and applications**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. 264 p.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CARNEIRO, A. C. O. **Qualidade da madeira para produção de carvão vegetal**. Disponível em:

<[http://www.sif.org.br/arquivos\\_internos/downloads/Angelica+de+Cassia+Carneiro.pdf](http://www.sif.org.br/arquivos_internos/downloads/Angelica+de+Cassia+Carneiro.pdf)>. Acesso em: 14 dez. 2010.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA-CNPq; Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 39 p.

\_\_\_\_\_. **Mutambo *Guazuma ulmifolia***. Curitiba: EMBRAPA-URPFCS, 2007. 16 p. (Circular Técnica, 138).

CARVÃO vegetal: eucalipto na indústria de carvão vegetal. **Revista da Madeira**, São Paulo, v. 13, n. 75, ago. 2003. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acesso em: 15 dez. 2010.

CASTRO, G. R. **Síntese, caracterização e aplicação de celulose funcionalizada com ligante p-Aminobenzoico em pré-concentração de íons metálicos**. 2003. 57 p. Dissertação (Mestrado em Química Orgânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CONESA, J. A. et al. Analysis of different kinetic models in the dynamic pyrolysis of cellulose. **Thermochemica Acta**, Amsterdam, v. 254, n. 1, p. 175-192, Apr. 1995.

CORDERO, T. et al. On the kinetics of thermal decomposition of wood and wood components. **Thermochemical Acta**, Amsterdam, v. 164, n. 1, p. 135-144, Jan. 1990.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia**. 1996. 35 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.

CUNHA, M. P. S. C. et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 1989. v. 2, p. 93-121.

DELBEN, D. et al. Pirólise à vácuo da aroeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBECIMat, 2006. 1 CD-ROM.

DOAT, J.; PETROFF, G. La carbonization des bois tropicaux. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-Sur-Marne, v. 159, p. 55-72, 1975.

DOCUMENTO de origem florestal. Disponível em:  
<<http://www.Ibama.gov.br/recursos-florestais/documentos/relatorios-dof/>>.  
Acesso em: 2 nov. 2010.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 36-41, jul./dez. 2008.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**. Washington: Government Office, 1955. 528 p.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

HERGERT, H. L. **Lignins**: occurrence, formation, structure and reations. New York: J. Wiley, 1971. 297 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2009**. Rio de Janeiro, 2010. 45 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Monitoramento do desenvolvimento no bioma cerrado 2002-2008**. Brasília, 2009. 6 p.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Uma política para a madeira energética**. Rio de Janeiro, 2006. 15 p.

IONASHIRO, M. **Fundamentos da termogravimetria**: análise térmica diferencial/calorimetria exploratória diferencial. São Paulo: Giz, 2005. 96 p.

IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica. **Cerâmica**, São Paulo, v. 26, n. 121, p. 17-24, jan. 1980.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: IPT, 1989. 6 p. (Comunicação Técnica, 1797).

KASTANAKI, E. et al. Thermogravimetric studies of the behavior of lignite-biomass blends during devolatilization. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 77/78, p. 159-166, June 2002.

KIM, H. et al. Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 451, n. 1/2, p. 181, Dec. 2006.

KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B. **Química da madeira**. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2005. 96 p. (Série Didática, 01/05).

LELLES, J. G. de; SILVA, F. P. da; SILVA, J. de C. Caracterização do carvão vegetal produzido a partir da madeira *Acacia mangium*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 20, n. 1, p. 87-92, jan./fev. 1996.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 342 p.

MEDEIROS, C. A.; REZENDE, M. E. A. Alcatrão vegetal: perspectivas de produção e utilização. **Revista da Fundação João Pinheiro**, Belo Horizonte, v. 13, n. 9/12, p. 42-48, set./dez. 1983.

MENDHAM, J. et al. **Vogel's textbook of quantitative chemical analysis**. Edinburgh: Prentice Hall, 2000. 906 p.

MENDIBURU, F. **Statistical procedures for agricultural research version 2.11.1**. Disponível em: <<http://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu>>. Acesso em: 8 nov. 2010.

MEYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, n. 6701, p. 853-858, Feb. 2000.

MORAIS, A. et al. Studies on polyphenols and lignin of astronium urundeuva wood. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 10, n. 6, p. 447-452, Dec. 1999.

MÜLLER-HAGEDORN, M. et al. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 68, n. 8, p. 231-249, Aug. 2003.

\_\_\_\_\_. Investigation of thermal degradation of three wood species as initial step in combustion of biomass. **Proceedings of the Combustion Institute**, New York, v. 29, n. 1, p. 399-406, 2002.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.



OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. 2003. 122 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

\_\_\_\_\_. **Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus grandis (W. Hillex-Maiden)**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1988.

OLIVEIRA, E. et al. Estrutura anatômica da Madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 311-318, mar./abr. 2006.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Propriedades do carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Carvão vegetal**. Belo Horizonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 9-61.

ÓRFÃO, J. J. M.; ANTUNES, F. J. A.; FIGUEIREDO, J. L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials: three independent reactions model. **Fuel**, London, v. 78, n. 3, p. 349-358, Feb. 1999.

ÓRFÃO, J. J. M.; FIGUEIREDO, J. L. A simplified method for determination of lignocellulosic materials pyrolysis kinetics from isothermal thermogravimetric experiments. **Thermochemica Acta**, Amsterdam, v. 380, n. 1, p. 67-78, Nov. 2001.

PASTORE, T. C. M.; OKINO, E. Y. A.; PASTORE JÚNIOR, F. P. **Carbonização de madeiras da Amazônia: parte I, floresta nacional do Tapajós**. Brasília: IBAMA, 1989. 12 p. (Série Técnica, 12).

PENEDO, W. R. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 173 p.

\_\_\_\_\_. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1981. v. 1, 131 p. (Série de Publicações Técnicas, 4).

\_\_\_\_\_. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 393 p.

PEREIRA, J. C. D.; LAVORANTI, O. J. Comparação da qualidade da madeira de três procedências de *Mimosa scabrella* Benth. para fins energéticos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, v. 12, p. 30-34, jun. 1986.

PINHEIRO, P. C. C. et al. **A produção de carvão vegetal**. 2. ed. Belo Horizonte: CETEC, 2008. 103 p.

PLANETA SUSTENTÁVEL. **Governo lança PPCerrado**. Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.com.br/noticias/governo-lanca-ppcerrado-bioma-desmatamento-596981.shtml>>. Acesso em: 15 nov. 2010.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: Foundation for Statistical Computing, 2005. 2576 p.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, dez. 2006.

ROCHA, J. D.; MESA-PÉREZ, J. M.; CORTEZ, L. A. B. **Aspectos teóricos e práticos do processo de pirólise de biomassa**. Itajubá: UNIFEI, 2004. 12 p.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do Cerrado**. 2008. 57 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SHEBANI, A. N. A. J.; REENEN, A. J. van; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 471, n. 1/2, p. 43-50, May 2008.

SILVA, G. J. et al. Avaliação de plantas adultas de espécies arbóreas do cerrado em função do clima. **Agricultura Tropical**, Bogotá, v. 8, n. 1, p. 43-56, 2004.

SYRED, C. et al. A clean, efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). **Fuel**, London, v. 85, n. 12, p. 1566-1578, Dec. 2006.

TRUGILHO, P. F. **Carbonização da madeira e controle de qualidade do carvão vegetal**. Lavras: UFLA, 2006. 41 p. Apostila.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, jul./dez. 2001.

\_\_\_\_\_. Caracterização de espécies nativas e exóticas amazônicas e do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 15, n. 2, p. 144-151, maio/ago. 1991.

\_\_\_\_\_. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, jul./dez. 2005.

TSUJIYAMA, D. S.; MIYAMORI, A. Assignment of DCS thermograms of wood and its components. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 351, n. 1, p. 177-181, June 2000.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80, jan./mar. 2002.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. C. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, jan./mar. 2010.

VALENTE, A. F.; LELLES, J. G. Carbonização da madeira de Eucalyptus. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 141, p. 74-79, set. 1986.

VÁRHEGYI, G. et al. Kinetic modeling of biomass pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 42, n. 1, p. 73-87, June 1997.

VELLA, M. M. C. F. et al. Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 41/42, p. 64-76, jan./dez. 1989.

## ANEXO I

Resumo da análise de variância das principais características da madeira e do carvão vegetal.

Quadrado Médio							
FV	GL	Ext	Lig	Holo	Cz(Mad)	DB	PCS(MAD)
Espécie	4	3,5485ns	25,0074*	36,5131*	0,1274ns	0,03686*	4499,26*
Erro	15	1,8132	5,6863	5,669	0,1175	0,0063	2497,93
Total	19						
CV%		21,51	10,23	3,47	19,08	4,99	1,11
Média Geral		6,26	23,31	68,62	1,80	0,50	4518,67
FV	GL	RGC	TMV	TCF	Cz (CV)	DRA	PCS (CV)
Espécie	4	8,1607*	10,4031*	25,346*	6,2809*	0,31151*	191231,2*
Erro	15	0,3373	3,3166	3,0205	0,4029	0,00	37418
Total	19						
CV%		1,8	14,54	2,07	18,15	8,73	2,6
Média Geral		32,29	12,52	83,98	3,49	0,39	7440,20

\*Característica significativa a 5% de probabilidade pelo Teste de Scott-Knott; ns-características não significativas a 5% de probabilidade.

**Ext** – teor de extrativos, **Lig**- teor de lignina, **Holo**- teor de holocelulose, **Cz**- teor de cinzas na madeira, **DB**- densidade básica, **PCS (MAD)**- Poder calorífico superior da madeira, **RGC**- rendimento gravimétrico do carvão, **TMV**- teor de materiais voláteis, **TCF**- teor de carbono fixo, **Cz (CV)**- teor de cinzas no carvão vegetal, **DRA**- Densidade relativa aparente, **PCV (CV)**- poder calorífico superior do carvão vegetal.