



**Universidade Estadual do Centro-Oeste**

**ANDRÉ LUIS TRENTIN SCREMIN**


**Estudo Energético e Físicoquímico do Carvão Vegetal de  
*Eucalyptus dunnii* Maiden**

**MESTRADO EM  
BIOENERGIA**

**GUARAPUAVA**

**2012**

**ANDRÉ LUIS TRENTIN SCREMIN**



**Estudo Energético e Físicoquímico do Carvão Vegetal de  
*Eucalyptus dunnii* Maiden**

MESTRADO EM  
BIOENERGIA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador:  
Prof Dr. Luciano Farinha Watzlawick.  
Co-orientação:  
Prof Dr. Juliano Resende.

**GUARAPUAVA**

**2012**

# ANDRÉ LUIS TRENTIN SCREMIN

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das Exigências do programa de Pós Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de mestre.

## BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Orientador  
Universidade Estadual do Centro - Oeste

---

Prof. Componente da Banca  
Universidade Estadual do Centro - Oeste

---

Prof. Componente da Banca  
Universidade Estadual do Centro - Oeste

Guarapuava, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_.

*Aos meus pais Divonsir e Tânia, a avó Izaura, aos meus irmãos Milena, Rafael e a namorada Vanessa, dedico.*

## **AGRADECIMENTO (S)**

Primeiramente quero agradecer a Deus, pela saúde, disposição e proteção para que eu conseguisse realizar o presente trabalho.

A minha família pelo carinho e apoio em todos os momentos em que mais precisei.

A minha namorada pela compreensão, amor e carinho que teve comigo, na realização do trabalho.

Ao professor, orientador e amigo Dr. Luciano Farinha Watzlawick, pela sua compreensão e competência, em todas as fases do trabalho, sempre presente nas horas que precisei para desenvolver um bom trabalho.

Ao professor, co-orientador Dr. Juliano Resende pela amizade e contribuição no desenvolvimento do trabalho.

A professora Dr. Gilmara de Oliveira Machado, pela sua amizade, contribuição e ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas de turma em especial ao André Gallina pela amizade, ajuda e motivação na realização da dissertação.

A Lucília da Rosa de Lima secretária do Programa de Pós Graduação em Bioenergia, pelas informações repassadas durante os dois anos do mestrado.

Aos professores Dr. Eder Carlos Ferreira de Souza, Dr. Augusto Celso Antunes, Dra. Sandra Regina Masetto Antunes e ao Ms Nilson Sabino por permitir a realização da parte do trabalho no laboratório da UEPG, e pela disponibilidade de ajudar-me em algumas etapas no desenvolvimento do trabalho.

A Dra. Julia Streski e ao Prof<sup>o</sup> Dr. Jaime Alberti Gomes por permitir a utilização do laboratório para a realização do trabalho no CESCAGE.

A CAPES por validar esta pesquisa viabilizando recursos para que a mesma pudesse ser concretizada.

*“ Cada pessoa em sua existência pode ter duas atitudes: construir ou plantar. Os construtores podem demorar anos em sua tarefas, mas um dia terminam aquilo que estavam fazendo. Então param e ficam limitados em suas próprias paredes. A vida perde o sentido quando a construção acaba. Mas existe os que plantam. Estes ás vezes, sofrem com tempestades, com as estações e raramente, descansam. Mas ao contrário de um edifício, o jardim jamais para de crescer. E, ao mesmo tempo que exige a atenção do jardineiro,também permite que, para ele, a vida seja uma grande aventura. Os jardineiros sempre se reconhecerão entre si porque sabem que na história da cada planta, está o crescimento de toda a terra.”*

*(Paulo Coelho)*

## SUMÁRIO

|   |             |
|---|-------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>                        | <b>i</b>    |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>                        | <b>iii</b>  |
| <b>LISTA DE EQUAÇÕES.....</b>                       | <b>v</b>    |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>          | <b>vi</b>   |
| <b>RESUMO.....</b>                                  | <b>vii</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                | <b>viii</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                           | <b>16</b>   |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>                             | <b>18</b>   |
| <b>3 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                   | <b>19</b>   |
| 3.1 Setor Florestal Brasileiro.....                 | 19          |
| 3.1.1 Florestas Plantadas.....                      | 19          |
| 3.1.2 Florestas Energéticas.....                    | 20          |
| 3.2 Biomassa Florestal.....                         | 22          |
| 3.2.1 Matéria Prima: Eucalipto.....                 | 23          |
| 3.2.2 Espécie: <i>Eucalyptus dunnii</i> Maiden..... | 24          |
| 3.3 Parâmetros da Matéria Prima .....               | 25          |
| 3.3.1 Densidade Básica.....                         | 25          |
| 3.3.2 Teor de Umidade.....                          | 26          |
| 3.4 Processo de Carbonização.....                   | 26          |
| 3.4.1 Carbonização da Celulose.....                 | 29          |
| 3.4.2 Carbonização da Hemicelulose.....             | 29          |
| 3.4.3 Carbonização da Lignina.....                  | 30          |
| 3.5 Produção de Carvão Vegetal.....                 | 30          |
| 3.5.1 Carvão Vegetal.....                           | 30          |
| 3.5.2 Parâmetros de Produção.....                   | 32          |
| 3.6 Propriedades do Carvão Vegetal.....             | 32          |
| 3.6.1 Rendimento Gravimétrico.....                  | 32          |
| 3.6.2 Poder Calorífico.....                         | 33          |
| 3.6.3 Propriedades Químicas.....                    | 33          |
| 3.6.4 Propriedades Físicas.....                     | 35          |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>  | <b>37</b> |
| 4.1 Procedência da Madeira Utilizada.....                                       | 37        |
| 4.2 Características Avaliadas na Madeira.....                                   | 38        |
| 4.2.1 Determinação do Teor de Umidade da Serragem da Madeira.....               | 38        |
| 4.2.2 Determinação da Densidade Volumétrica dos Corpos-de-Prova da Madeira..... | 39        |
| 4.3 Características Avaliadas no Carvão Vegetal.....                            | 41        |
| 4.3.1 Determinação da Densidade Volumétrica dos Corpos-de-Prova do Carvão.....  | 41        |
| 4.3.2 Determinação do Teor de Umidade do Carvão.....                            | 42        |
| 4.3.3 Determinação dos Materiais voláteis.....                                  | 42        |
| 4.3.4 Determinação das Cinzas.....  | 43        |
| 4.3.5 Determinação do Carbono Fixo.....   | 43        |
| 4.4 Rendimento Gravimétrico.....  | 44        |
| 4.5 Rendimento do Carbono Fixo.....   | 45        |
| 4.6 Poder Calorífico.....   | 45        |
| 4.7 Rendimento Energético.....  | 46        |
| 4.8 Delineamento Experimental.....  | 47        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>  | <b>48</b> |
| 5.1 Separação das Árvores por Classes em Relação ao Diâmetro.....               | 48        |
| 5.2 Carbonização da Madeira.....  | 48        |
| 5.3 Propriedades da Madeira.....  | 49        |
| 5.4 Propriedades do Carvão.....   | 55        |
| <b>6 CONCLUSÃO.....</b>   | <b>81</b> |
| <b>7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>                                    | <b>82</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>83</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>  | <b>90</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> – Gráfico de Distribuição da Matriz Energética Brasileira, 2010.....                            | 21 |
| <b>Figura 2</b> – Gráfico de Distribuição da Produção de Biomassa por Capacidade Instalada no Brasil, 2010..... | 22 |
| <b>Figura 3</b> – Amostras cilíndricas de 50 cm de comprimento.....   | 37 |
| <b>Figura 4</b> – Corpo de prova dimensão 2x3x5 cm utilizado a pesquisa.....                                    | 37 |
| <b>Figura 5</b> – Corpos-de-Prova sendo picados.....  | 38 |
| <b>Figura 6</b> – Moinho de 42 mesh.....  | 38 |
| <b>Figura 7</b> – Estufa regulada para 105°C.....   | 38 |
| <b>Figura 8</b> – Forno Tipo Mufla.....   | 40 |
| <b>Figura 9</b> – Modelo SDT Q 600.....   | 45 |
| <b>Figura 10</b> – Amostras carbonizadas a 300° C.....  | 48 |
| <b>Figura 11</b> – Amostras Carbonizadas a 350° C.....  | 48 |
| <b>Figura 12</b> – Amostras Carbonizadas a 400° C.....  | 49 |
| <b>Figura 13</b> – Amostras Carbonizadas a 450° C.....  | 49 |
| <b>Figura 14</b> – Amostras Carbonizadas a 500° C.....  | 49 |
| <b>Figura 15</b> – Curvas de TG da serragem de eucalipto por classe, em atmosfera de ar sintético.....          | 53 |
| <b>Figura 16</b> – Curvas de DTA da serragem de eucalipto por classe, em atmosfera de ar sintético.....         | 54 |
| <b>Figura 17</b> – Curvas de TG do carvão vegetal a 300°C por classe em atmosfera de ar sintético.....          | 67 |
| <b>Figura 18</b> – Curvas de TG do carvão vegetal a 350°C por classe em atmosfera de ar sintético.....          | 68 |
| <b>Figura 19</b> – Curvas de TG do carvão vegetal a 400°C por classe em atmosfera de ar sintético.....          | 69 |
| <b>Figura 20</b> – Curvas de TG do carvão vegetal a 450°C por classe em atmosfera de ar sintético.....          | 70 |
| <b>Figura 21</b> – Curvas de TG do carvão vegetal a 500°C por classe em atmosfera de ar sintético.....          | 71 |
| <b>Figura 22</b> – Curvas de DTA do carvão vegetal a 300°C por classe, em atmosfera de ar sintético.....        |    |

- Figura 23** – Curvas de DTA do carvão vegetal a 350°C por classe, em atmosfera de ar sintético.....
- Figura 24** – Curvas de DTA do carvão vegetal a 400°C por classe, em atmosfera de ar sintético.....
- Figura 25** – Curvas de DTA do carvão vegetal a 450°C por classe, em atmosfera de ar sintético.....
- Figura 26** – Curvas de DTA do carvão vegetal a 500°C por classe, em atmosfera de ar sintético.....
- Figura 27** – Gráfico do Rendimento Energético da classe I em relação as temperaturas.....
- Figura 28** – Gráfico do Rendimento Energético da classe II em relação as temperaturas.....
- Figura 29** – Gráfico do Rendimento Energético da classe III em relação as temperaturas.....
- Figura 30** – Gráfico do Rendimento Energético da classe IV em relação as temperaturas.....
- Figura 31** – Gráfico do Rendimento Energético da classe V em relação as temperaturas.....

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> – Plantio anual de eucalipto (1.000 hectares), pelos produtores de florestas plantadas – ABRAF, no período de 2005 a 2010. ....                         | 19 |
| <b>Tabela 2</b> – Área plantada com eucaliptos no Brasil, em 2010, pelos principais Estados produtores.....   | 20 |
| <b>Tabela 3</b> – Fases do fenômeno de conversão da madeira para carvão vegetal...  | 28 |
| <b>Tabela 4</b> – Demonstração de cada classe em relação às temperaturas de carbonização e suas taxa de aquecimento.....  | 40 |
| <b>Tabela 5</b> – Demonstração de cada classe em relação às temperaturas de carbonização e taxas de resfriamento.....   | 41 |
| <b>Tabela 6</b> – Separação das 30 árvores por classe em relação ao diâmetro.....   | 48 |
| <b>Tabela 7</b> – Médias de cada classe da densidade básica da madeira.....   | 50 |
| <b>Tabela 8</b> – Médias de cada classe em Teor de umidade da madeira.....  | 51 |
| <b>Tabela 9</b> – Médias das classes em relação ao Material Volátil de serragem da madeira.....   | 51 |
| <b>Tabela 10</b> – Médias das classes em relação a Cinzas de serragem da madeira..  | 52 |
| <b>Tabela 11</b> – Médias das classes em relação ao Carbono Fixo de serragem da madeira.....  | 52 |
| <b>Tabela 12</b> – Perda de massa das características químicas de serragem da madeira pela TG de cada classe.....   | 53 |
| <b>Tabela 13</b> – Poder Calorífico estimado pela Análise Térmica (DTA), com a Queima de Materiais Voláteis e Carbono Fixo para cada classe de serragem da madeira..... | 55 |
| <b>Tabela 14</b> – Médias das classes em relação à densidade do carvão vegetal.....   | 56 |
| <b>Tabela 15</b> – Médias das temperaturas em relação à densidade do carvão vegetal.....  | 56 |
| <b>Tabela 16</b> – Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação à densidade do carvão vegetal.....   | 56 |
| <b>Tabela 17</b> – Médias das classes em relação ao teor de umidade do carvão vegetal.....  | 57 |
| <b>Tabela 18</b> – Médias das temperaturas em relação ao teor de umidade do carvão vegetal.....   | 58 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 19</b> – Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação ao teor de umidade do carvão vegetal.....         | 58 |
| <b>Tabela 20</b> – Médias das classes em relação ao material volátil do carvão vegetal.....  | 59 |
| <b>Tabela 21</b> – Médias das temperaturas em relação ao material volátil do carvão vegetal.....                                     | 59 |
| <b>Tabela 22</b> – Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação aos materiais voláteis do carvão vegetal.....     | 60 |
| <b>Tabela 23</b> – Médias das classes em relação a cinzas do carvão vegetal.....   | 60 |
| <b>Tabela 24</b> – Médias das temperaturas em relação a cinzas do carvão vegetal....   | 61 |
| <b>Tabela 25</b> – Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação à cinza do carvão vegetal.....                    | 61 |
| <b>Tabela 26</b> – Médias das classes em relação ao carbono fixo do carvão vegetal..   | 62 |
| <b>Tabela 27</b> – Médias das temperaturas em relação ao carbono fixo do carvão vegetal.....   | 62 |
| <b>Tabela 28</b> – Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação ao carbono fixo do carvão vegetal.....            | 62 |
| <b>Tabela 29</b> – Médias das classes em relação ao Rendimento Gravimétrico do carvão vegetal.....                                   | 63 |
| <b>Tabela 30</b> – Médias das temperaturas em relação ao Rendimento Gravimétrico do carvão vegetal.....                              | 64 |
| <b>Tabela 31</b> – Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação ao Rendimento Gravimétrico do carvão vegetal..... | 65 |
| <b>Tabela 32</b> – Médias das classes em relação ao Rendimento Carbono Fixo do carvão vegetal.....                                   | 65 |
| <b>Tabela 33</b> – Médias das temperaturas em relação ao Rendimento Carbono Fixo do carvão vegetal.....                              | 66 |
| <b>Tabela 34</b> – Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação ao Rendimento Carbono Fixo do carvão vegetal..... | 66 |
| <b>Tabela 35</b> – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal carbonizados a 300° C pela TG de cada classe.....   | 67 |
| <b>Tabela 36</b> – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal   |    |

|  |    |
|--|----|
| carbonizados a 350° C pela TG de cada classe.....  | 68 |
| <b>Tabela 37</b> – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal carbonizados a 400° C pela TG de cada classe..... | 69 |
| <b>Tabela 38</b> – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal carbonizados a 450° C pela TG de cada classe..... | 70 |
| <b>Tabela 39</b> – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal carbonizados a 500° C pela TG de cada classe..... | 71 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| <b>Equação 1</b> – Determinação do Teor de Umidade da Madeira.....                      | 39 |
| <b>Equação 2</b> – Determinação da Densidade da Madeira.....                            | 39 |
| <b>Equação 3</b> – Determinação da Densidade dos Corpos-de-Prova do Carvão.....         | 41 |
| <b>Equação 4</b> – Determinação do Teor de Umidade do Carvão.....                       | 42 |
| <b>Equação 5</b> – Determinação dos Materiais Voláteis do Carvão.....                   | 43 |
| <b>Equação 6</b> – Determinação das Cinzas do Carvão.....                               | 43 |
| <b>Equação 7</b> – Determinação do Carbono Fixo do Carvão.....                          | 44 |
| <b>Equação 8</b> – Determinação do Rendimento Gravimétrico.....                         | 44 |
| <b>Equação 9</b> – Determinação do Rendimento do Carbono Fixo.....                      | 45 |
| <b>Equação 10</b> – Calibração do Equipamento para Baixa Temperatura.....               | 45 |
| <b>Equação 11</b> – Calibração do Equipamento para Alta Temperatura.....                | 45 |
| <b>Equação 12</b> – Determinação do Poder Calorífico estimado pela Análise Térmica..... | 46 |
| <b>Equação 13</b> – Determinação do Rendimento Energético.....                          | 46 |
| <b>Equação 14</b> – Determinação das classes em relação ao número de árvores.....       | 48 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas.

ANOVA – Análise de Variância.

a.a – Ao ano.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

Cfb – Clima temperado húmido com Verão temperado.

CAP – Circunferência à Altura do Peito (cm).

DAP – Diâmetro à Altura do Peito (cm).

DIC – Delineamento Inteiramente Casualizado.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

NBR – Norma Brasileira.

kW - Quilowatt.

## RESUMO

SCREMIN, André Luis Trentin. **Influência da Temperatura Final de Carbonização nas Características Físicas, Químicas e Energéticas do Carvão Vegetal de *Eucalyptus dunnii* Maiden.** 2012. Número total de folhas 103. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Guarapuava, 2012.

O Carvão vegetal é uma fonte energética obtida a partir da carbonização da madeira. O potencial energético de uma biomassa vegetal é avaliado a partir de seu poder calorífico, seguido de uma análise química imediata quanto aos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixos presentes na biomassa e no carvão vegetal. O objetivo principal do trabalho foi verificar a influência da temperatura final de carbonização sobre as características físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal proveniente do *Eucalyptus dunnii*. Para o trabalho foram utilizadas 30 árvores onde em cada árvore foi obtida as amostras cilíndricas de 50 cm. Essas amostras cilíndricas foram cortadas na altura referente ao diâmetro à altura do peito (DAP), a 1,30 m em relação ao nível do solo. Deste cilindro foram obtidos corpos-de-prova de dimensões 2x3x5 cm para serem utilizados nos ensaios de carbonização. Os corpos-de-prova foram organizados em 5 classes (22 – 29,1 ( cm), 29,2 – 36,3 (cm), 36,4 – 43,5 (cm), 43,6 – 50,7 (cm) e 50,8 – 58 (cm)) em relação ao (CAP) circunferência á altura do peito. Os corpos-de-prova foram carbonizados por meio de um forno do tipo mufla utilizando 5 temperaturas 300°, 350°C, 400°C, 450° e 500°C sob condições controladas. A metodologia adotada para analisar as propriedades químicas do carvão (materiais voláteis, carbono fixo e cinzas) foi a NBR 8112 da ABNT e foi utilizado o equipamento Modelo SDT Q 600 para determinar a análise termogravimétrica (TG) de modo a correlacionar o carvão produzido com a madeira original e a (DTA) para determinar o poder calorífico superior. A fim de se reduzir o erro experimental, todas as análises foram realizadas em quatro repetições e o programa utilizado foi o ASSISTAT versão 7.6 beta (2011). Na avaliação do experimento foi realizado o teste de bartlett para verificar se as amostras são homogêneas (madeira e Carvão). Em seguida foi realizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) para as madeiras e o (DIC) em arranjo fatorial para o carvão com 2 fatores temperaturas (300°C, 350°C, 400°C, 450°C e 500°C) e as classes (22 – 29,1 cm, 29,2 – 36,3 cm, 36,4 – 43,5 cm, 43,6 – 50,7 cm e 50,8 – 58 cm) e para comparação das médias tanto para madeira como para o carvão foi realizado o teste de tukey a 5% de probabilidade. Os resultados evidenciam que não houve diferença estatística significativa na densidade da madeira apenas no teor de umidade entre as classes. Com a influência das temperaturas entre as classes as propriedades químicas do carvão diferem entre si estatisticamente entre as classes, temperaturas e nos dois fatores. O trabalho conclui que a classe III (36,4 – 43,5 (cm)) na temperatura 400°C apresentou maior poder calorífico 21,99 MJ/Kg ou 5253,89 Kcal/Kg, sendo o mais indicado como fonte de energia. Foi possível produzir carvão da espécie *Eucalyptus dunnii* Maiden nas temperaturas de 350°C, 400°C, 450°C e 500°C com características que tornam uma fonte alternativa de energia renovável.

**Palavras-chave:** Carbonização, Carvão Vegetal, Eucalitpo, Propriedades.



## ABSTRACT

SCREMIN, Andre Luis Trentin. **Influence of Carbonization Temperature in Final Physical, Chemical and Energy Coal Plant *Eucalyptus dunnii* Maiden.** 2012. Number total of leaves 103. Dissertation (Master in Bioenergy) - University of the Midwest, Guarapuava, 2012.

The Charcoal is an energetic source obtained through the wood carbonization process. The energetic potential of a vegetal biomass is rated from its heating power, followed by a chemical analysis for the levels of volatile materials, ashes and fix carbon in the biomass and in the Charcoal. The main goal of this work was to verify an influence of the final temperature of carbonization over the physical, chemical and energetic characteristics of the Charcoal from *Eucalyptus dunnii*. For the research 30 trees were used and in each tree a cylindrical sample of 50 cm were taken. These cylindrical samples were cut at the height related to the diameter at breast height (DBH), at 1.30 m above the ground level. From these cylinders were obtained the test pieces with the dimensions of 2x3x5 cm to be used in tests of carbonization. The bodies of the test piece were organized into five classes (22 - 29.1 (cm), 29.2 to 36.3 (cm), 36.4 to 43.5 (cm), 43.6 to 50.7 (cm) and 50.8 - 58 (cm)) in relation to (BH) the circumference at breast height. The test pieces were carbonized using 5 different temperatures of an furnace oven; 300°, 350°C, 400°C, 450° and 500°C under controlled conditions. The methodology used to analyze the chemical properties of the Charcoal (volatile materials, fix carbon and ashes) was the NBR 8112 from ABNT and the Model equipment SDT Q 600 was used to determine the thermogravimetry analyzes (TG) correlating the produced Charcoal with the original wood and the (DTA) in order to determine the superior heating power. The results showed there was no statistical difference in the wood's density but just in the percentage of humidity among the classes. With the influence of the temperatures among the classes the chemical properties of the Charcoal differ statistically among the classes, temperatures and both factors. The class III in the temperature of 400°C shows higher heating power 21,99 MJ/Kg or 5253,89 Kcal/Kg. With the intent of reducing the experimental error, all analyzes were made in four different repetitions and the ASSISTAT version 7.6 beta program was used for the experimental lineation (2011).

**Key-Words:** Carbonization, Charcoal, Eucalyptus, Properties.

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de carvão vegetal no Brasil é de significativa importância econômica e se desenvolve basicamente de duas maneiras: tradicional, empregando lenha de floresta nativa, cortada para transformação em áreas agrícolas; e moderna, carbonizando lenha de floresta plantada (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Atualmente, a produção de energia é uma necessidade incontestável, pois a busca por combustível, tanto no meio rural como no urbano, é crescente e tem levado à procura por energias alternativas, como o carvão vegetal, que além de ser um produto derivado de matéria-prima renovável, usinas termoelétricas e indústrias químicas (SILVA, 2007).

Carvão vegetal é o produto sólido obtido por meio da carbonização ou pirólise da madeira, cujas características dependem das técnicas utilizadas para sua obtenção e o uso para o qual se destina (BRITO e BARRICHELO, 1981).

No desenvolvimento de processos alternativos de geração de energia, a pirólise da madeira de eucalipto espécie de crescimento rápido torna-se cada vez mais atrativa em virtude das grandes quantidades geradas anualmente, bem como por constituir possível fonte de energia. A pirólise surge como uma fonte alternativa para o aproveitamento da madeira por meio de conversão térmica, minimizando-se drasticamente o impacto ambiental obtendo-se produtos de considerável valor econômico (MCKENDRY, 2002).

A biomassa florestal proveniente de plantios de espécies nativas ou exóticas tem sido tradicionalmente usada como lenha e para a produção principalmente de carvão vegetal, papel/celulose, madeira serrada, placas de madeira, extração de resinas, óleos essenciais e móveis. O conceito da utilização de vários produtos da floresta vem sendo adotado por diversas empresas no Brasil, com o objetivo de diversificar a produção e atender outras necessidades, sendo a mais importante a produção de energia (RAMOS, 2001).

Grande parte da energia necessária para as indústrias de celulose e papel é suprida pelos resíduos florestais, oriundos da exploração da madeira para celulose e ao mesmo tempo garantir a continuidade de abastecimento a baixo custo. A biomassa é uma importante fonte de energia para a humanidade (RAMOS, 2001).

A energia vinda da biomassa é considerável durável porque através do manejo correto, pode-se garantir seu ciclo de reflorestamento ou replantio. É uma fonte alternativa e renovável no sentido de que toda energia obtida da biomassa origina-se de processos biológicos, que aproveitaram a energia solar, tendo o desafio de buscar soluções para usar de forma cada vez mais eficiente esse recurso natural. Essa busca é compensatória em razão dos grandes benefícios ocasionados pelo uso energético da biomassa (DERMIRBA, 2001).

A realização do trabalho surgiu da grande utilização da madeira de Eucalipto *Dunni* para fins energéticos. Há relativamente poucos estudos que descrevem o potencial energético da espécie *Eucalyptus dunni* Maiden para a Região Centro-Sul do Paraná. É muito importante para um país tropical como o Brasil, sendo a madeira na sua forma direta como lenha ou do seu derivado, o carvão vegetal, amplamente utilizado para finalidade energética.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Verificar a influência da temperatura final de carbonização sobre as características físicas (umidade e densidade), químicas (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) e energéticas do carvão vegetal (poder calorífico) proveniente do *Eucalyptus dunnii* Maiden.

### 2.2 Específicos

Realizar a carbonização nas seguintes temperaturas 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C.

Determinar as características físico-químicas do carvão vegetal por meio da determinação da densidade, umidade e dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

Determinar os rendimentos: gravimétrico, carbono fixo e energético e estimar o poder calorífico pela análise térmica.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Setor Florestal

##### 3.1.1 Florestas Plantadas

O Brasil conta com aproximadamente 523,70 milhões de hectares de florestas, sendo 517,09 milhões de hectares de florestas naturais, representando seus distintos biomas e 6,78 milhões de hectares de florestas plantadas (ABRAF, 2011).

O setor de florestas plantadas vem desempenhando importante papel no cenário socioeconômico do País, contribuindo com a produção de bens e serviços, agregação de valor aos produtos florestais e para a geração de empregos, divisas, tributos e rendas. Ele tornou-se importante vetor de desenvolvimento sustentável graças ao tratamento responsável, em termos econômicos, ambientais e sociais, dedicado à cadeia produtiva e indústrias de base florestal, ao desenvolvimento de pesquisas, formação de profissionais, capacidade empreendedora, disponibilidade de terras e de mão de obra e condições edafoclimáticas favoráveis, resultando no presente sucesso (ABRAF, 2011).

Seguramente, o Brasil detém uma das mais avançadas silvicultura de florestas plantadas do mundo, sendo o eucalipto o seu principal componente. Complementarmente às vantagens citadas, conta-se com o crescente interesse de investidores nacionais e internacionais em formar ativos florestais e participar dessa promissora atividade econômica no Brasil (ABRAF, 2011).

A tabela 1 mostra o plantio anual de eucalipto pelos produtores de florestas plantadas.

**Tabela 1** – Plantio anual de eucalipto (1.000 hectares), pelos produtores de florestas plantadas – ABRAF, no período de 2005 a 2010.

| <b>ANO</b>                 | <b>2005</b> | <b>2006</b> | <b>2007</b> | <b>2008</b> | <b>2009</b> | <b>2010</b> |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>PLANTIO/<br/>1000ha</b> | 3.463       | 3.746       | 3.970       | 4.325       | 4.516       | 4.754       |

Fonte: Anuário Estatístico da ABRAF (2011).

\*Associadas individuais e coletivas da ABRAF (2011)

Na tabela 2 mostra-se os principais estados produtores em área plantada com eucalipto no Brasil.

**Tabela 2** – Área plantada com eucaliptos no Brasil, em 2010, pelos principais Estados produtores.

| <b>ESTADO</b>      | <b>Eucaliptos (ha)</b> |
|--------------------|------------------------|
| Minas Gerais       | 1.400.000              |
| São Paulo          | 1.044.813              |
| Bahia              | 378.195                |
| Mato Grosso do Sul | 631.464                |
| Rio Grande do Sul  | 273.042                |
| Espírito Santo     | 203.885                |
| Paraná             | 161.422                |
| Maranhão           | 151.403                |
| Pará               | 148.656                |
| Santa Catarina     | 102.399                |
| Mato Grosso        | 61.950                 |
| Goiás              | 58.519                 |
| Amapá              | 49.369                 |
| Tocantins          | 47.542                 |
| Piauí              | 37.025                 |
| Outros Estados     | 4.650                  |
| <b>Total</b>       | <b>4.754.334</b>       |

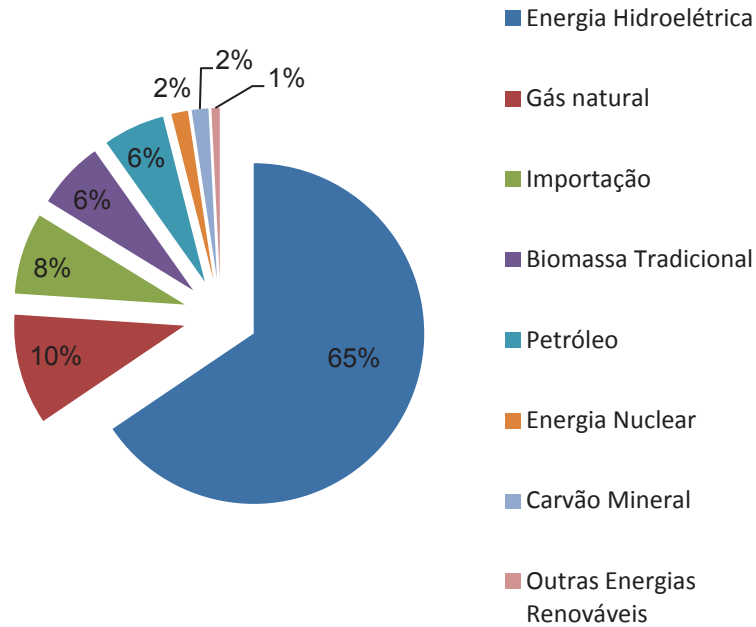
Fonte: Anuário Estatístico da ABRAF, 2011, ano base 2010.

### 3.1.2 Florestas Energéticas

A crescente busca mundial por alternativas fontes renováveis de energia tem levado um número significativo de países a promover alterações na composição de suas matrizes energéticas. Em países como a Alemanha, Áustria, Canadá, Dinamarca, Finlândia e Suécia a produção de energia a partir de fontes renováveis está sendo incentivada através de subsídios governamentais. A União Européia planeja que até 2020 aproximadamente 20% de sua energia seja produzida através de recursos renováveis (ABRAF, 2011).

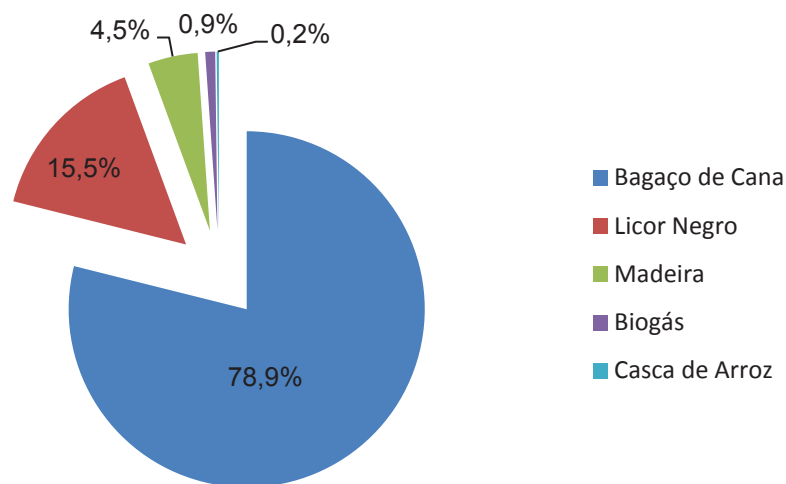
O potencial e a importância do Brasil na produção de energia renovável são bastante expressivos. Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2010 revelaram que a energia produzida pelo uso de fontes renováveis representa 73 % da matriz energética nacional (Gráfico 1). O consumo de energia elétrica deve subir 9,4% em 2011, acompanhando o avanço econômico do país. As projeções para o período de 2012 a 2020 indicam um crescimento médio da demanda de 5,2%

a.a. Portanto, há espaço e oportunidade para se produzir energia a partir de biomassa, uma fonte de baixo custo e investimento, ecologicamente adequado e sócio economicamente correto (ANEEL, 2011).



**Figura 1** - Gráfico de Distribuição da Matriz Energética Brasileira, 2010.  
Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A biomassa é apontada como um complemento mais limpo e seguro, por utilizar fontes como madeira e seus resíduos, bagaço de cana, licor negro (nas indústrias de papel e celulose), capim elefante, biogás e as chamadas florestas energéticas, para geração de energia térmica e termelétrica (Gráfico 2). A energia oriunda de biomassa tradicional representa hoje aproximadamente 6,5% da matriz elétrica (o que equivale a 7,9 milhões de kW produzidos segundo a ANEEL), podendo representar 14% até 2020.



**Figura 2** - Gráfico da produção de Biomassa por Capacidade Instalada no Brasil, 2010.  
Fonte: ANEEL (2010).

### 3.2 Biomassa Florestal

Os termos “massa” ou “biomassa” geralmente são atribuídos à massa seca. Biomassa pode se referir a toda a árvore (fuste mais copa) ou qualquer uma das partes, por exemplo, biomassa da ponta de fuste e galhos maiores, o processamento da madeira é gerada uma quantidade de material que não é utilizado, denominado de refugo ou resíduo (SILVA, 2005).

De acordo com Couto et al., (2000), a biomassa florestal possui características tais que permitem a sua utilização como fonte alternativa de energia principalmente pela queima da madeira, como carvão.

A utilização da madeira para produção de energia depende de algumas características químicas e físicas da madeira como, por exemplo, o teor de lignina e a densidade básica respectivamente (TRUGILHO, 1995).

Segundo Baggio e Carpanezzi (1995), o conhecimento da quantidade e da qualidade dos resíduos florestais permite avaliar o seu potencial de aproveitamento.

São considerados biomassa para fins energéticos: culturas e descartes das lavouras, restos florestais, esterco de animais domésticos, esgotos urbanos, lixo doméstico e o descarte das indústrias madeireiras (TRIPATHI, 1998; GOLDEMBERG, 1998).

Os principais resíduos da indústria madeireira são: a serragem, originada da operação das serras, que pode chegar a 12% do volume total de matéria-prima; os



cepilhos ou maravalhas, gerados pelas plainas, que podem chegar a 20% do volume total de matéria-prima, nas indústrias de beneficiamento; a lenha ou cavacos, composta por costaneiras, aparas, refilos, cascas e outros, que pode chegar a 50% do volume total de matéria-prima, nas serrarias e laminadoras (HÜEBLIN, 2001).

Segundo Lima (2005), os resíduos podem ser utilizados pela própria indústria que os produz, principalmente como energia, ou podem ser vendidos para outras empresas e aplicados em usos diversos. Se isto for feita, os resíduos deixam de serem problemas e passam a ser um subproduto, podendo até gerar lucro.

No Brasil, a madeira é amplamente usada para a finalidade energética. Existe certa tradição no emprego dos recursos naturais renováveis, em que a energia hidráulica, a lenha, o bagaço de cana e outras fontes primárias contribuem com cerca de 38,40% do total do consumo energético nacional. Neste contexto, a lenha contribui com 8,40% do consumo total (BRASIL, 2004). A energia da biomassa florestal é, ainda, muito importante para o Brasil, especialmente devido à ampla disponibilidade de terras, aliado ao alto índice de insolação (ANDRADE, 1993).

Segundo Soares (1995), afirma que a quantidade de biomassa em uma floresta pode variar de centenas de quilos a dezenas de toneladas por hectare, dependendo entre outros do tipo, do espaçamento e da idade da vegetação.

### 3.2.1 Matéria Prima: Eucalipto

O eucalipto é originário da Austrália e da Indonésia, chegou ao Brasil em 1825 como plantas ornamental. Sua utilização para fins econômicos só teve início em 1903, quando passou a ser empregado na produção de dormentes ferroviários e lenha para alimentar as locomotivas da época. Da fibra se faz a celulose para a produção de diversos tipos de papel, tecido sintético e cápsulas de remédios. A madeira é utilizada na produção de móveis, acabamentos refinados da construção civil, pisos, postes e mastros para barcos. Dele também se obtém o óleo essencial usado em produtos de limpeza, alimentícios, perfumes e remédios. Sem falar do mel de alta qualidade produzido a partir do néctar de suas flores (BERTOLA, 2006).

O gênero *Eucalyptus* se apresenta como um dos mais importantes para produção de madeira em árvores de rápido crescimento, não só pela capacidade produtiva e adaptabilidade a diversos ambientes de clima e solo, mas também pela grande diversidade de espécies, tornando possível atender aos requisitos

tecnológicos dos mais diferentes segmentos de produção industrial. Nenhuma outra espécie florestal conseguiu reunir tantas vantagens e, por isso, é um dos gêneros mais plantados do mundo, fazendo parte da economia de mais de cem países (OLIVEIRA et al., 2008).

Espécies de eucaliptos apresentam características adequadas para o uso em escala comercial, tais como crescimento rápido da ordem de 40m<sup>3</sup> ha ano, alta produção de celulose e resistência às adversidades das condições ambientais e doenças (SANTOS et al., 2001).

Para Santos et al., (2001), a biomassa proveniente a partir da madeira de eucaliptos atua como fonte de energia e contribui com mais de 25% da matriz de 8,4% energética brasileira. Nessa significativa parcela, destaca-se o uso da lenha e do carvão vegetal na indústria, na agropecuária e no ambiente doméstico.

A tendência de elevação dos preços dos combustíveis fósseis e o desenvolvimento consistente de tecnologias para obtenção de combustíveis “verdes”, a partir da biomassa, indicam a necessidade da expansão dos plantios florestais voltados para a produção de energia. Nesse particular, o eucalipto, por apresentar altas produtividades, rápido crescimento e ampla adaptação, é uma opção viável para aumento da renda e diversificação de atividades na propriedade rural (FILHO; SANTOS, 2005).

### 3.2.2 Espécie: *Eucalyptus dunnii* Maiden

A introdução do *Eucalyptus dunnii* Maiden no Brasil ocorreu em 1964, na região de Monte Alegre (PR) a 900 m de altitude. Atinge alturas que variam de 30 a 40 metros, podendo chegar até 60 metros, com fustes compridos e retos, e um diâmetro máximo à altura do peito de 1,0 a 1,5m de DAP (ocasionalmente 2,5m), com fuste limpo de 30 a 35m (SPELTZ; MONTEIRO, 1982).

Segundo Higa (1998) a madeira de *Eucalyptus dunnii* Maiden é indicada para, lenha, carvão, moirões, postes e madeira serrada. A sua densidade básica, aos oito anos de idade, foi estimado em 0,48 g cm<sup>-3</sup>. A análise da composição química mostrou 7,96% de extrativos totais, 7,07% de holocelulose e 21,34% de lignina, proporcionando, assim, melhor deslignificação de sua madeira, o que torna o processo de fabricação de celulose mais eficiente e econômico.

Apresenta bom comportamento em áreas mais frias (JOVANOVIC; BOOTH, 2002), sendo o seu plantio indicado em regiões com temperaturas mínimas absolutas de até  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sob condições de aclimação prévia por gradual redução de temperatura na estação fria, suportando até 22 geadas anuais (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006).

Segundo Speltz e Monteiro (1982), o *Eucalyptus dunnii* Maiden, em seu ambiente natural encontra-se distribuído numa faixa latitudinal que varia de  $29^{\circ}$  a  $30^{\circ}$  sul e com precipitação entre 800 e 1.500 mm. É uma espécie que se adapta melhor a solos úmidos de maior fertilidade, e um bom desenvolvimento em solos derivados de rochas sedimentares, particularmente xistos bem drenados.

### 3.3 Parâmetros da Matéria Prima

#### 3.3.1 Densidade Básica

A densidade básica da madeira é reconhecida como um dos mais importantes parâmetros para avaliação da sua qualidade, por ser de fácil determinação e estar relacionada às suas demais características (SHIMOYAMA; BARRICHELLO, 1991).

É um dos índices mais importantes a ser considerado dentre as diversas propriedades físicas da madeira, pois além de afetar as demais propriedades interfere de forma significativa na qualidade de seus derivados (FERREIRA, 2000).

A densidade da madeira, bem como as demais propriedades, varia de uma espécie para outra. As variações da densidade são resultantes das diferentes espessuras da parede celular, das dimensões das células, das inter-relações entre esses dois fatores e da quantidade de componentes presentes por unidade de volume (PANSHIN; ZEEUW, 1980).

A densidade, porém não deve ser considerada como um índice isolado de qualidade da madeira. A composição química e as dimensões são fatores que devem ser também considerados (WENZL, 1970; BRASIL et. al., 1977).

Na produção de carvão vegetal, a densidade deve ser encarada sob vários aspectos, sendo que várias considerações podem ser feitas em torno dela. A densidade da madeira afeta a capacidade de produção de carvoaria, porque para um determinado volume de forno a utilização de madeira mais densa resulta em maior produção de carvão em peso. Além disso, madeira mais densa produz carvão

com densidade mais elevada, com vantagens para alguns de seus usos (OLIVEIRA et. al., 1982b; BRITO, 1993).

### 3.3.2 Teor de Umidade

É importante que o teor de umidade da madeira a ser usada como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manejo e o custo de transporte, agregando valor ao combustível (CUNHA, 1989).

O teor de umidade máximo que uma madeira pode ser queimada no forno está em torno de 65% a 70% em base úmida. Por existir essa umidade, é inevitável que ocorra uma perda de calor decorrente da presença de água na madeira, pois sua evaporação absorve energia térmica (JARA, 1989).

Segundo CUNHA et al., (1989), quanto maior o conteúdo de umidade da madeira, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia durante a combustão da madeira.

Por outro lado, quando a madeira for previamente seca a 0% de umidade, é exposta ao meio ambiente, ela absorve a água que está dispersa no ar em forma de vapor. A água adsorvida corresponde à água de adesão e o teor de umidade final alcançado pela madeira, que depende das condições do meio e da espécie vegetal considerada, é denominado umidade de equilíbrio com o ambiente (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

### 3.4 Processo de Carbonização

A carbonização é um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas variando de (500-800°C) em atmosfera não oxidante, dando lugar à formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de vapores orgânicos condensáveis. As proporções destes compostos dependem do método de carbonização empregado, dos parâmetros do processo e das características do material a ser tratado (BEENACKERS; BRIDGWATER, 1989).

O processo de carbonização tem inúmeras pesquisas e estudos para o conhecimento dos mecanismos e processos que levam à transformação da madeira em carvão. Uma dessas pesquisas são as análises, termogravimétrica (TG) e termogravimétrica diferencial (DTG), que têm sido freqüentemente usadas nos

estudos de decomposição térmica da madeira. A análise termogravimétrica mostra como a madeira se comporta quando aquecida, sendo possível verificar em que temperatura é iniciada a decomposição térmica e, ainda, em que faixa de temperatura a decomposição térmica é mais pronunciada. A análise termogravimétrica diferencial torna possível a identificação dos picos e, ou das faixas de ocorrência das reações endotérmicas e exotérmicas do processo (OLIVEIRA et al., 1982a).

Para a produção de carvão vegetal é necessário à aplicação de calor em quantidade suficientemente controlada sobre a madeira para que ocorra apenas a sua degradação parcial. Nesse princípio é que se encontram a base os processos práticos destinados à produção. As variações mais importantes que podem existir ficam por conta do dimensionamento e capacidade de produção dos equipamentos, materiais construtivos, níveis de controle de processo e origem do calor necessário para o aquecimento da carga de madeira a ser convertida em carvão (BRITO, 1990a).

Segundo Brito (1990b), um dos sistemas de produção de carvão vegetal é o sistema com fonte interna de calor ou por combustão parcial – onde o calor é fornecido mediante a combustão de parte da carga destinada para carbonização. Neste caso, cerca de 10 a 20% do peso da carga de madeira é “sacrificada” mediante combustão total, gerando o calor necessário ao processo de pirólise.

Nesse tipo de sistema de produção de carvão vegetal as características apresentadas são de baixo rendimento, é simples, rudimentar e exige um maior tempo de produção. Esse baixo rendimento é influenciado pela fonte de energia inicial pela combustão parcial da madeira carbonizada (TRUGILHO, 1999).

A carbonização se inicia com a introdução controlada de ar no forno, de modo a queimar parte da lenha contida e aquecer o forno até atingir a temperatura de carbonização. Os fornos mais utilizados com base nesse princípio são os fornos de alvenaria, encosta e metálicos. Esses fornos apresentam características com baixo rendimento, fácil controle de manobra de carbonização, baixo custo, facilidade de vedação das entradas de ar, fácil construção e possibilidade de deslocamento acompanhando a exploração florestal (PINHEIRO et al., 2006).

Outro tipo de sistema para a produção de carvão vegetal é o sistema de fonte externa de calor. Onde o processo de aproveitamento de energia para realizar a carbonização é mais eficiente, como os de carbonização contínua e processos

descontínuos, nos quais ocorre o aproveitamento dos gases de carbonização para o início das reações térmicas envolvidas do processo. (TRUGILHO, 1999).

A tabela 1 apresenta as fases de conversão da madeira para carvão vegetal com os respectivos fenômenos e produtos de cada fase.

**Tabela 3** - Fases do fenômeno de conversão da madeira para carvão vegetal.

| FASE | TEMPERATURA (°C)  | FÊNOMENOS E PRODUTOS   |
|------|-------------------|--|
| I    | até 200           | - poucas reações importantes<br>- perda de umidade<br>- fase endotérmica   |
| II   | 200 até 270-280   | - aumento de reação e na eliminação de gases<br>- a madeira passa para a cor marrom arroxeada<br>- fase endotérmica  |
| III  | 280 até 350 – 380 | - importante fase de reações e grande eliminação de gases<br>- composição de gases: centena de componentes químicos orgânicos (alguns recuperáveis)<br>Ex: Acido Acético, Metanol, Acetona, Fenóis, Aldeídos, Hidrocarbonetos, Alcatrões, etc.<br>- o resíduo final dessa fase já é o carvão vegetal, mas que ainda apresenta compostos volatizáveis em sua estrutura<br>- fase exotérmica |
| IV   | 380-500           | - redução da saída de gases<br>- o carvão vegetal passa a sofrer uma purificação na sua composição química com a eliminação do restante dos gases voláteis contendo H e O. O carvão torna-se mais rico em carbono em sua estrutura (carbono não volatizável ou carbono fixo)<br>- fase exotérmica  |
| V    | Acima de 500      | - degradação do carvão<br>- término da carbonização e início da gaseificação do carvão<br>- fase exotérmica  |

Fonte: (DOAT; PETROF, 1975).

A carbonização consiste em um conjunto de complexas reações químicas acompanhadas de processos de transferência de calor e massa. A composição heterogênea das frações produzidas e as possíveis interações entre si tornam ainda mais complexo o processo. As reações que incidem diretamente sobre o

substrato celulósico são denominadas reações primárias e aquelas que incidem na decomposição dos produtos intermediários, tais como vapores orgânicos e levoglucosan, são denominadas reações secundárias. Estas reações ocorrem durante a degradação dos principais componentes da biomassa: a Hemicelulose, Celulose e Lignina (PINHEIRO et al., 2001; MARTIN, 1989).

#### 3.4.1 Carbonização da Celulose

A celulose é o componente da madeira mais fácil de ser isolado sendo, portanto, o componente mais estudado. A celulose produz, sob atmosfera de nitrogênio, 34,2% de carvão a 300 °C. Este resultado, no entanto, decresce vigorosamente com o aumento da temperatura, e a 600 °C a degradação da celulose é quase completa, deixando um resíduo de carvão de somente 5%. Como o processo de carbonização ocorre a temperaturas superiores de 300 °C pode-se concluir que a celulose contribui pouco para o rendimento gravimétrico do carvão (OLIVEIRA et al., 1982a).

#### 3.4.2 Carbonização da Hemicelulose

As hemiceluloses constituem o componente da madeira responsável pela formação da maior parcela de ácido acético. É o componente da madeira menos estável, devido à sua natureza amorfa (OLIVEIRA et al., 1982b).

O fornecimento de calor ao processo produzirá uma mudança brusca no comportamento das hemiceluloses, pelo menos no que se refere ao rendimento em carvão. Na temperatura de 500 °C o rendimento em carvão é apenas 10%. Os produtos formados a 300 °C, quando submetidos a temperaturas mais altas, irão sofrer mudanças radicais, decompondo-se e volatilizando, sendo que a maior parte dos voláteis irão se condensar, formando a maior fração a 500 °C que é o líquido condensado. O baixo rendimento em carvão a 500 °C (10%) mostra que as hemiceluloses também contribuem muito pouco para a formação de carvão no processo de carbonização em fornos de alvenaria (OLIVEIRA et al., 1982a).

### 3.4.3 Carbonização da Lignina

A lignina é o componente da madeira de mais difícil isolamento, por isso os estudos relativos ao processo de decomposição são escassos. Os mecanismos de decomposição da lignina não estão bem definidos, devido à sua estrutura relativamente complexa, ocasionando rupturas e formação de inúmeros compostos. O comportamento da lignina frente ao processo de carbonização é o principal responsável pela formação do carvão. O produto mais importante da decomposição da lignina é o carvão, mostrando a relação entre lignina e rendimento em carvão. Em temperaturas de 450 a 550 °C se obtém um rendimento em carvão de 55% (SARKANEN; LUDWIG, 1971; OLIVEIRA et al., 1982a).

## 3.5 Produção de Carvão Vegetal

### 3.5.1 Carvão Vegetal

O carvão vegetal é o resultado da decomposição térmica da biomassa na ausência de ar, processo denomina pirólise. Sua utilização vem sendo feita desde os primórdios da humanidade para diversas finalidades, tais como: aquecimento, preparo de alimentos, produção dos diferentes tipos de metais e outros (PINHEIRO et al., 2008).

É originado a partir de um longo processo natural, denominado carbonização, que é submetido à ação da temperatura, em função da natureza desse processo, o carvão vegetal também é chamado de artificial (BARSA, 1998).

Segundo Quadros (2005), o resultado da carbonização da madeira, apresentando as seguintes características: coloração negra brilhante, poroso, de fácil combustão, capaz de gerar grandes quantidades de calor e possui uma maior concentração de carbono do que o material se originou.

Foi o primeiro combustível utilizado em alto – forno e seu uso têm persistido em países onde existe suprimento de matéria – prima, conhecimento técnico e mercado. Sua grande importância como combustível metalúrgico tem sido reconhecida por ser derivado de uma fonte de carbono renovável (OLIVEIRA, et al., 1982).



Sempre foi visto como uma matéria-prima de segunda categoria, de baixo custo, obtido por atividades secundárias de desmatamento de florestas naturais. Com a escassez destas florestas e a baixa disponibilidade das fontes energéticas convencionais (petróleo e carvão mineral), o carvão vegetal passou a ter um papel principal como fonte de energia (OLIVEIRA et al., 1982b).

De acordo com Mendes et al., (1982), entre as propriedades desejáveis do carvão vegetal para a siderurgia, podem-se citar composição química, densidade, tamanho médio de partículas e friabilidade, que estão ligadas à resistência mecânica do carvão, que é um fator importante no processo da fabricação do aço.

A transformação da lenha em carvão vegetal começa a partir de 180°C e se completa em torno de 400°C (ROHDE, 2007). Este processo necessita de uma fonte de calor, podendo esta ser proveniente da própria combustão do material a ser carbonizado (fonte interna) ou a partir do aquecimento elétrico (fonte externa) (BRITO, 1990b).

Segundo Nogueira e Lora (2003), a produção de carvão vegetal apresenta grande importância econômica e pode ser realizada de forma tradicional, utilizando lenha de floresta nativa e moderna, carbonizando lenha de plantios florestais.

O carvão vegetal é muito mais do que uma fonte de energia, fornece energia para o processo e promove reações químicas denominadas fonte termorreduzora. Assim, o carvão vegetal é o principal insumo utilizado no setor siderúrgico sendo à base desse produto e constitui-se também no maior custo, com participação superior a 50% na produção de ferro gusa (CARVALHO et al., 2006).

Segundo Lin (2006), o carvão vegetal é mais puro e apresentam propriedades químicas superiores praticamente não possuem enxofre, que é um poluente e contaminante do ferro gusa. Apresenta teores de cinzas dez vezes menores em relação ao coque e produz dois terços a menos de escórias. Isso resulta em ferro gusa menos quebradiço mais resistente e maleável.

O carvão vegetal é uma fonte de energia renovável e limpa, possui um balanço negativo de CO<sub>2</sub>, as plantações absorvem mais carbono durante seu crescimento do que é liberado no processo de carvoejamento e na produção de ferro gusa (SAMPAIO, 1999).

### 3.5.2 Parâmetros de Produção

Conforme Almeida (1982) o processo de carbonização pode ser dividido em quatro fases distintas secagem, pré-carbonização, carbonização e fase final.

Segundo Martin (1989) o tipo de biomassa e os parâmetros de produção têm influência decisiva no tipo de produto resultante e nas proporções das frações sólidas, líquidas e gasosas obtidas. Os principais parâmetros que têm influência direta nos resultados do processo são: Temperatura, Tempo de Residência, Taxa de Aquecimento, Pressão, Tipo de atmosfera e Uso de catalisadores.

As características finais dos produtos obtidos também dependem em grande parte das propriedades físico-químicas da matéria-prima utilizada, por exemplo, a maior parte das frações voláteis é formada a partir da decomposição térmica da celulose e hemiceluloses. Por outro lado a lignina contribui para a formação de cerca de 50% do carbono fixo na fração sólida (OLIVEIRA, 1982a).

Portanto, materiais com alto teor de lignina são mais apropriados para a obtenção de alta concentração de carbono fixo na fração sólida. Outro fator importante é a granulometria, a qual influencia diretamente nos tipos de reações, por exemplo, em pedaços muito grandes de madeira os voláteis permanecem no interior do sólido por um período no qual são favorecidas as reações secundárias, enquanto que nas partículas menores, os voláteis são eliminados rapidamente do interior do sólido favorecendo a ocorrência das reações primárias (MARTIN, 1989).

## 3.6 Propriedades do Carvão Vegetal

### 3.6.1 Rendimento Gravimétrico

O rendimento gravimétrico pode ser definido como sendo o rendimento em carvão ao final do processo de carbonização considerando a matéria prima à madeira (eucalipto) como referência para o cálculo (OLIVEIRA, 1982a).

Segundo Oliveira (1988) o rendimento gravimétrico possui: correlação positiva com o teor de lignina total e teor de extrativos, correlação positiva com densidade básica da madeira. Considerando que geralmente madeiras com maiores teores de lignina são mais densas, logo estes fatores são em maior ou menor grau interdependentes e outros fatores importantes para o aumento do rendimento

gravimétrico são: temperatura máxima média na faixa dos 400 °C e taxa de aquecimento lento.

### 3.6.2 Poder Calorífico

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calor liberada na combustão completa de uma unidade de massa de madeira ou carvão vegetal, expressa em Kcal/Kg para combustíveis sólidos e líquidos e Kcal/m<sup>3</sup> para combustíveis gasosos. Esta propriedade é de grande importância, principalmente quando se pensa na utilização do carvão vegetal como fonte de energia em substituição aos combustíveis derivados do petróleo (MENDES et al. 1982).

Existem dois conceitos que precisam estar bem definidos: poder calorífico superior e poder calorífico inferior. O poder calorífico superior (PCS) é chamado quando a água formada durante a combustão é condensada (recuperação do calor latente de condensação), ou seja, não se leva em conta o calor necessário para evaporar a água formada durante a combustão do hidrogênio e a umidade do carvão (OLIVEIRA et al. 1982a).

O poder calorífico inferior (PCI) é chamado quando a combustão é efetuada a pressão constante, isto é, ao ar livre; nesse caso, a água de combustão não é condensada e é a situação que ocorre com a queima direta da madeira (OLIVEIRA et al. 1982b).

### 3.6.3 Propriedades Químicas

#### 3.6.3.1 Carbono fixo

O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira e inversamente proporcional ao teor de hemiceluloses. É uma função direta do rendimento gravimétrico e do teor de carbono fixo presente na madeira (OLIVEIRA, 1988).

Segundo Carmo (1988) a quantidade de carbono fixo fornecida por unidade de madeira é função da percentagem de lignina de madeira. Porém estudos mostram que para algumas espécies esta afirmativa não se aplica.

Existe uma relação entre carbono fixo e teor de materiais voláteis e de cinzas no carvão. Uma associação de materiais voláteis e de cinza no carvão resulta em maiores teores de carbono fixo e vice-versa (COTTA, 1996).

O controle da composição química, principalmente do carbono fixo, é importante, porque seu efeito reflete na utilização do forno por unidade de volume. Considerando-se um determinado alto forno e as mesmas condições operacionais à medida que se aumenta o teor de carbono fixo do carvão maior é utilização volumétrica do alto forno (ASSIS, 1982).

### 3.6.3.2 Cinzas

A cinza é um resíduo mineral proveniente dos componentes minerais do lenho e da casca. Geralmente o carvão vegetal apresenta sempre baixo teor de cinzas quando comparado com o coque mineral (CARMO, 1988).

Segundo Cotta (1996), o carvão produzido para fins siderúrgicos, deve ter uma menor proporção de materiais, pois quanto maior a proporção de materiais minerais na madeira, maior a produção de cinzas no carvão. O fósforo e o enxofre são constituintes da madeira, que em determinadas proporções acabam por serem fixados no carvão, em quantidades inaceitáveis.

Para Cortez et al., (1997), altos teores de elementos minerais no carvão vegetal, entre eles o fósforo e o enxofre, podem provocar a segregação, que consiste no acúmulo de impurezas, que na impossibilidade de se deslocarem no metal solidificado, vão sendo repelidas para o centro das peças, devido a solidificação ocorrer da periferia para o centro, Isto acarreta variações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos produtos, tornando-os duros e quebradiços, menos maleáveis e com campos favoráveis à propagação de fissuras.

### 3.6.3.3 Materiais Voláteis

Os materiais voláteis podem ser definidos como as substâncias que são despreendidas da madeira como gases durante a carbonização e/ou queima do carvão. Os fatores que influenciam os materiais voláteis no carvão são a temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da madeira. (CARMO, 1988).

Sendo a temperatura o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão. O efeito das matérias voláteis se dá na modificação estrutural do carvão. Porosidade, diâmetro médio dos poros, densidade e outras características físicas do carvão podem ser alteradas drasticamente pela eliminação dos voláteis (OLIVEIRA, 1982a).

Quanto maior o teor de materiais voláteis, maior expansão gasosa haverá durante a descida do carvão no alto-forno, gerando mais trincas e maior porosidade. Com o aumento desta última, as reações de gaseificação tendem a ocorrer no interior do carvão, ocasionando perda de massa interna. O carvão assim enfraquecido tende a se degradar com mais facilidade nas condições de operação do alto-forno, aumentando a geração de finos (COTTA, 1996).

### 3.6.4 Propriedades Físicas

#### 3.6.4.1 Densidade

No carvão vegetal a densidade é uma propriedade bastante importante, pois determina o volume ocupado pelo termo-redutor nos aparelhos de redução e gaseificação. Portanto, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível. Como o carvão vegetal é um material bastante poroso, com 70-80% de porosidade, a densidade varia conforme a técnica de medida (OLIVEIRA, 1982a).

A densidade do carvão varia de acordo com suas características de granulometria, e presença de trincas, sendo uma característica muito importante na qualidade do carvão, pois, afetará as demais propriedades do carvão (MENDES et al., 1982).

Segundo Mendes et al. (1982) existem três tipos de densidade que precisam estar bem definidas ao se falar de densidade no carvão:

- Densidade a Granel é a medida da densidade do carvão num dado volume conhecido.
- Densidade Aparente é a medida da densidade carvão considerando sua porosidade.
- Densidade Verdadeira é a medida da densidade da substância carvão, considera-se a densidade aparente descontando o volume de poros internos.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Procedência da Madeira Utilizada

A madeira selecionada para o trabalho foi proveniente da cidade de Guarapuava, Estado do Paraná que fica localizada nas coordenadas 25°23'42" de latitude Sul com interseção com o meridiano 51°27'28" de longitude Oeste, situado na região centro-sul no 3º planalto paranaense. O clima do município é classificado como do tipo "Cfb" (método de Köppen), clima subtropical não apresentando estação seca.

Para o presente trabalho foi utilizado a madeira de eucalipto da espécie *Eucalyptus dunnii* Maiden de 4 anos com espaçamento 3x2 m em uma área experimental no campus da CEDETEG - UNICENTRO. Para o trabalho foram amostrados 30 árvores, onde foi cortado na região do tronco de cada árvore referente ao diâmetro à altura do peito (dap), a 1,30 m em relação ao nível do solo, um cilindro no fuste de 50cm de comprimento. Destes cilindros de 50 cm (Figura 1), foram obtidos os corpos-de-prova com dimensão 2x3x5 cm (Figura 2) para serem utilizados no ensaio de carbonização.



**Figura 3** – Amostras cilíndricas de 50 cm de comprimento.



**Figura 4** – Corpo-de-prova dimensão 2x3x5 cm utilizados na pesquisa.

## 4.2 Características Avaliadas na Madeira

Para os ensaios de Análise Imediata (determinação de carbono fixo, voláteis e cinzas), umidade e TGA/DTA, inicialmente os corpos-de-prova foram picados (Figura 3) em seguida colocados no moinho de facas com peneira de 42 mesh com 0,35 mm (Figura 4) para que o material ficasse na forma de pó, sendo esse utilizado para a realização das análises (NBR 8112 e 6923 da ABNT).



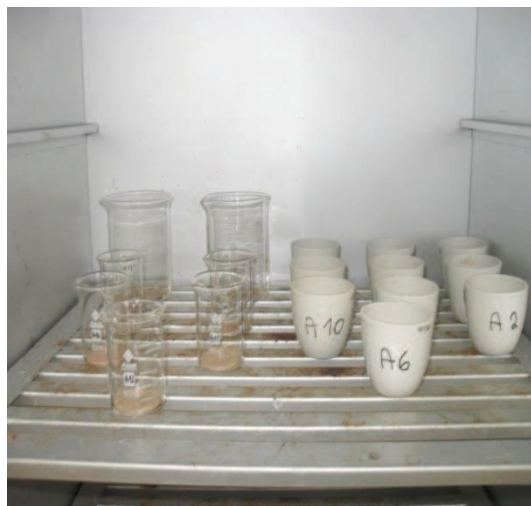
**Figura 5** – Corpos-de-Prova sendo picados.



**Figura 6** – Moinho com peneira de 42 mesh.

### 4.2.1 Determinação do Teor de Umidade da Serragem da Madeira

O teor de umidade foi determinado pelo método de secagem em estufa consiste em colocar cerca de um grama do material na estufa regulada para 105°C (Figura 5) até obter-se massa constante.



**Figura 7** – Estufa regulada para 105°C+/- 3°C.



A análise foi feita em quaduplicata, utilizando a equação 1.

$$U = [(P - Pas) / P] \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U: umidade em %.

P: é a massa inicial da amostra (g).

Pas: é a massa da amostra seca em estufa (g).

#### 4.2.2 Determinação da Densidade Volumétrica dos Corpos-de-Prova da Madeira

A densidade da madeira foi obtida pela relação entre a massa determinada em balança analítica e o volume medido com o auxílio de um paquímetro para cada corpo-de-prova de dimensões 2x3x5 cm.

A análise foi feita em quaduplicata, utilizando a equação 2.

$$d = MM / VM \quad (2)$$

Onde:

d: densidade (g/cm<sup>3</sup>).

MM: massa do corpo-de-prova seco(g).

VM: volume do corpo-de-prova seco (cm<sup>3</sup>).

#### 4.2.3 Carbonização dos Corpos-de-Prova da Madeira

Os corpos-de-prova de madeira foram carbonizados em laboratório, por meio de um forno do tipo mufla, (Figura 8) utilizando 5 temperaturas finais e sob condições controladas, com o objetivo de avaliar a variabilidade das propriedades do carvão. Para cada classe foi determinada a taxa de aquecimento (Tabela 4) e de resfriamento (Tabela 5) de carbonização.



**Figura 8** – Forno Tipo Mufla.

Antes de sofrer a carbonização, a madeira foi totalmente seca em estufa, a uma temperatura de  $105^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Para cada marcha de carbonização a temperatura inicial foi de  $25^{\circ}\text{C}$ . Quando chegou na temperatura de carbonização desejada, a mufla foi desligada e esperou até que a temperatura atinja  $200^{\circ}\text{C}$ . Uma vez que a temperatura atingiu  $200^{\circ}\text{C}$ , os corpos-de-prova foram removidos e acondicioná-los em um dessecador até temperatura ambiente. Foi usado em cada ensaio, 5 corpos-de-prova para cada classe e temperatura de carbonização. O tempo total de carbonização (aquecimento e resfriamento) foi de 2h.

**Tabela 4** – Demonstração de cada classe em relação às temperaturas de carbonização e suas taxa de aquecimento.

| Classes (cm) | 300°C<br>(min) | 350°C<br>(min) | 400°C<br>(min) | 450°C<br>(min) | 500°C<br>(min) | Taxa de<br>Aquecimento<br>°C/min | Tempo<br>Total |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------|
| 22 - 29,1    | 15             | -              | -              | -              | -              | 20                               | 15min          |
| 29,2 - 36,3  | 15             | 2              | -              | -              | -              | 20,5                             | 17min          |
| 36,4 - 43,5  | 15             | 2              | 3              | -              | -              | 17,5                             | 20min          |
| 43,6 - 50,7  | 15             | 2              | 3              | 2              | -              | 20,4                             | 22min          |
| 50,8 - 58    | 15             | 2              | 3              | 2              | 2              | 20,8                             | 24min          |

**Tabela 5** – Demonstração de cada classe em relação às temperaturas de carbonização e suas taxa de resfriamento.

| Classes (cm) | 300°C      | 350°C      | 400°C      | 450°C      | 500°C      | Taxa de Resfriamento °C/min | Tempo Total min |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|-----------------|
|              | a<br>200°C | a<br>200°C | a<br>200°C | a<br>200°C | a<br>200°C |                             |                 |
| 22 - 29,1    | 45min      | -          | -          | -          | -          | 6,66                        | 45min           |
| 29,2 - 36,3  | 45min      | 13min      | -          | -          | -          | 6,03                        | 58min           |
| 36,4 - 43,5  | 45min      | 13min      | 12min      | -          | -          | 8                           | 1h 10min        |
| 43,6 - 50,7  | 45min      | 13min      | 12min      | 13min      | -          | 5,42                        | 1h 23min        |
| 50,8 - 58    | 45min      | 13min      | 12min      | 13min      | 13min      | 5,20                        | 1h 36min        |

#### 4.3 Características Avaliadas no Carvão Vegetal

Os corpos-de-prova carbonizados foram picados em seguida colocados no moinho de 42 mesh para que o material ficasse em pó, sendo esse utilizando para a realização das análises físicas (umidade) e químicas (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) descrito segundo a norma (NBR 8112 / 6923 da ABNT e MB 15). Para determinar a densidade do carvão foi obtido pela relação entre a massa e o volume de cada corpo-de-prova.

##### 4.3.1 Determinação da Densidade Volumétrica dos Corpos-de-Prova do Carvão

A densidade do carvão foi obtida pela relação entre a massa determinada em balança analítica e o volume medido com o auxílio de um paquímetro, de cada corpo-de-prova de dimensões 2x3x5 cm.

A análise será feita em quadruplicata, utilizando a equação 3.

$$d = MM / VM \quad (3)$$

Onde:

d: densidade (g/cm<sup>3</sup>).

MM: massa do corpo-de-prova seco(g).

VM: volume do corpo-de-prova seco (cm<sup>3</sup>).

#### 4.3.2 Determinação do Teor de Umidade do Carvão

O método da secagem em estufa consiste em se colocar cerca de um grama do carvão passado na peneira de 42 mesh num cadinho sem tampa sob os seguintes passos:

- Colocar na estufa regulada para 105°C até massa constante (aproximadamente 1 hora e 30 min).
- Retirar da estufa, colocar num dessecador e deixar esfriar até temperatura ambiente.

A análise foi feita em quadruplicata, utilizando a equação 4.

$$U = [(P - P_{as}) / P] \times 100 \quad (4)$$

Onde:

U: umidade em %.

P: é a massa inicial da amostra (g).

P<sub>as</sub>: é a massa da amostra seca em estufa (g).

#### 4.3.3 Determinação dos Materiais Voláteis

Para determinar os materiais voláteis é preciso colocar um grama da amostra de carvão passado na peneira de 42 mesh num cadinho com tampa, sob os seguintes passos:

- O aquecimento deve ser feito em uma mufla à 950°C.
- Com a porta da mufla aberta, pôr os cadinhos, por dois minutos na parte externa da mufla sobre a porta (temperatura aproximadamente 300°C);
- Por três minutos, colocar os cadinhos na beira da abertura da mufla ainda com a porta aberta (temperatura aproximadamente 500°C);
- Finalmente, colocar as amostras no fundo da mufla por seis minutos, com a porta fechada.
- Esfriar as amostras no dessecador por 20 min e pesar.

A análise foi feita em quadruplicata utilizando a equação 5.

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

MV: materiais voláteis em %.

$m_2$ : massa de cadinho + massa de carvão depois da retirada umidade na estufa.

$m_3$ : massa de cadinho + massa de carvão depois de retirada da determinação de voláteis.

#### 4.3.4 Determinação das Cinzas

Para determinar as cinzas é preciso colocar um grama da amostra de carvão passado na peneira de 42 mesh num cadinho com tampa, sob os seguintes passos:

- O teor de cinzas é determinado pela pirólise do resíduo a 750° C por 6 horas.
- Colocar o cadinho + amostra com tampa por seis horas na mufla.
- Terminada a incineração, retirar o cadinho + amostra com tampa da mufla, e colocar num dessecador por 20 min.
- Após resfriado medir a massa com a mesma aproximação inicial.

A análise foi feita em quadriplicata utilizando a equação 6.

$$C = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

C: cinzas em %.

$m_0$ : massa do cadinho em (g).

$m_1$ : massa do cadinho mais resíduo em (g).

m: massa da amostra em (g).

#### 4.3.5 Determinação do Carbono Fixo

A determinação do carbono fixo é feita por diferença. Calculadas as porcentagens de umidade, de matéria volátil (propriamente dita) e de cinza, a

diferença entre 100 e a soma dessas três porcentagens dará a porcentagem do carbono fixo.

A análise foi feita em quadruplicata utilizando a equação 7.

$$\text{CF} = 100 - (\%U + \%MV + \%Z) \quad (7)$$

Onde:

CF: carbono fixo em %.

%U: porcentagem de umidade.

%MV: porcentagem de materiais voláteis.

%Z: porcentagem de cinzas.

#### 4.4 Rendimento Gravimétrico

É o rendimento em carvão ao final do processo de carbonização considerando a matéria prima (madeira) como referência para o cálculo.

A análise foi feita em quadruplicata utilizando a equação 8.

$$\text{RG} = (\text{PCS} - \text{PMS}) / 100 \quad (8)$$

Onde:

RG: Rendimento Gravimétrico em %.

PCS: Peso de Carvão Seca (g).

PMS: Peso de Madeira Seca (g).

#### 4.5 Rendimento do Carbono Fixo

É o rendimento do carbono fixo ao final do processo de carbonização considerando o rendimento gravimétrico de carbonização (%) com o teor de carbono fixo (%).

A análise foi feita em quadruplicata utilizando a equação 9

$$\text{RCF} = (\text{RGC} \times \text{TCF}) / 100 \quad (9)$$

Onde:

RCF: rendimento em carbono fixo (%).

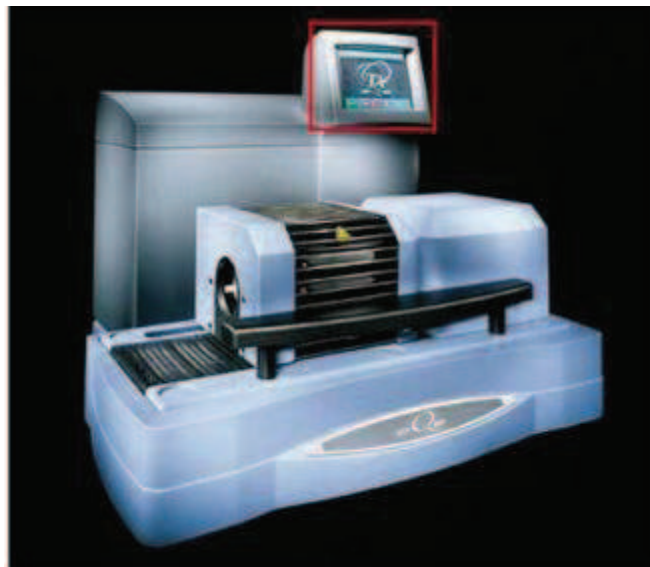
RGC: rendimento gravimétrico da carbonização (%).

TCF: teor de carbono fixo (%).

#### 4.6 Poder Calorífico

Para determinar o poder calorífico foi realizado a análise, termogravimétrica (TG) e a análise térmica diferencial (DTA) (Figura 12), que têm sido freqüentemente usadas nos estudos de decomposição térmica da madeira.

Para calibrar o equipamento foi utilizado a equação 10 e 11, utilizando como padrão o alumínio (Temperatura de fusão 660,325°C, Entalpia de fusão 400,1 J/g) e o estanho (Temperatura de fusão 231,928°C, Entalpia de fusão 60,6 J/g)) para os cálculos de energia associada aos picos de DTA.



**Figura 9** - Modelo SDT Q 600.

$$E = (H_L \cdot m_L) / A_L \quad (10)$$

$$E = (H_H \cdot m_H) / A_H \quad (11)$$

Onde:

E: Calibração Constante (J mg), (g °C min) ou (J mg).

H: Entalpia de Transição (J/g).

m: Massa da Amostra (mg).

T: Temperatura de Transição (°C).

A: Área Integrada de Transição (°C min).

Subscritos referem-se a:

L: Referência à baixa temperatura.

H: Referência à alta temperatura.

Depois da calibração registrar a massa da amostra ( $m_x$ ) e a temperatura de pico ( $T_x$ ), utilizando a equação 12 para determinar a constante de calibração a esta temperatura.

$$E = (T_x - T_L) \frac{(E_H - E_L)}{(T_H - T_L)} - E_L \quad (12)$$

O instrumento de DTA consiste de um único forno e dois cadinhos com termopares. Um cadinho é para a amostra que está sendo testado e o outro é de um material de referência, muitas vezes, pó de alumina. A amostra ou temperaturas de referência do termopar são dadas pela diferença de tensão entre as pernas de termopar A e B para qualquer copo com junção fria adequado compensação. Na DTA, o sinal diferença é obtido por curto-circuito do B pernas e medir a tensão entre as pernas A. No calor de fluxo DSC, o conectando tira de metal é usado freqüentemente como um elemento ativo de sensores para obter o sinal de diferença através da medição da tensão entre as pernas de B e B (NIST Recommended Practice Guide, 2006).

#### 4.7 Rendimento Energético

O rendimento energético está relacionado com rendimento em massa e o poder calorífico superior do carvão e madeira por meio da equação 10

$$RE = RG \times (PCS \text{ do C} / PCS \text{ da M}) \quad (13)$$

Onde:

RE: rendimento energético.



RG: rendimento gravimétrico.

PCS do C: poder calorífico superior do carvão.

PCS da M: poder calorífico superior da madeira.

#### 4.8 Delineamento Experimental

Na avaliação do experimento foi realizado o teste de bartlett para verificar se as amostras são homogêneas (madeira e Carvão). Em seguida foi realizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) para madeira e o (DIC) em arranjo fatorial para o carvão com 2 fatores temperaturas (300°C, 350°C, 400°C, 450°C e 500°C) e as classes (22 – 29,1 cm, 29,2 – 36,3 cm, 36,4 – 43,5 cm, 43,6 – 50,7 cm e 50,8 – 58 cm). Para comparação das médias tanto para madeira como para o carvão foi realizado o teste de tukey a 5% de probabilidade. A fim de se reduzir o erro experimental, todas as análises foram realizadas em quatro repetições e o programa utilizado foi o ASSISTAT versão 7.6 beta (2011).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Separação das Árvores por Classes em Relação ao Diâmetro

As 30 árvores foram cortadas na altura do peito, onde obteve cilindros de 50 cm de comprimento, e foram separadas por classes em relação ao diâmetro conforme mostra a tabela 4, utilizando a equação 14.

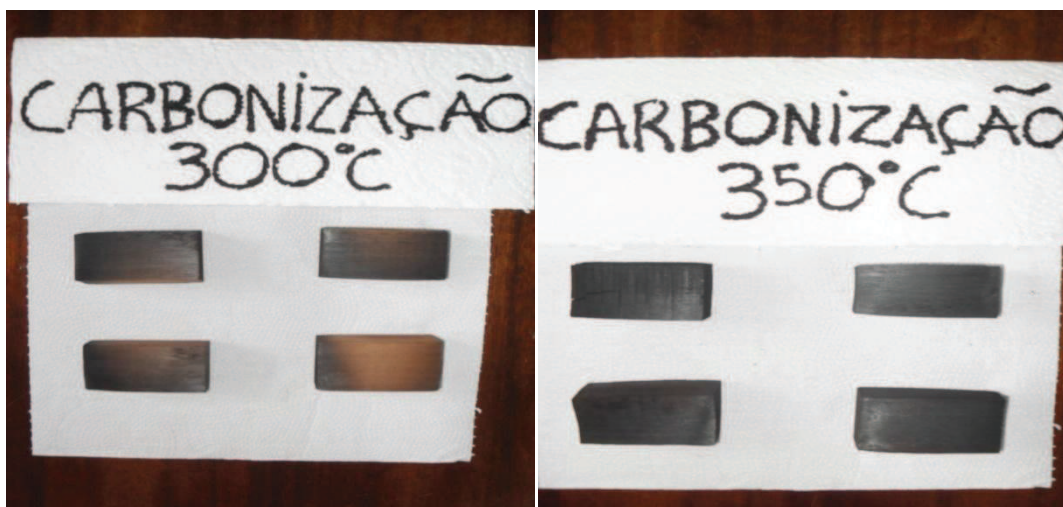
**Tabela 6** – Separação das 30 árvores por classe em relação ao diâmetro.

| Amostras   | Amplitude de Classe (cm) | Freqüência | Ponto – Médio (cm) |
|------------|--------------------------|------------|--------------------|
| Calssse I  | 22 – 29,1                | 4          | 25,55              |
| Classe II  | 29,2 – 36,3              | 4          | 32,75              |
| Classe III | 36,4 – 43,5              | 7          | 39,95              |
| Classe IV  | 43,6 – 50,7              | 11         | 47,15              |
| Classe V   | 50,8 - 58                | 4          | 54,4               |

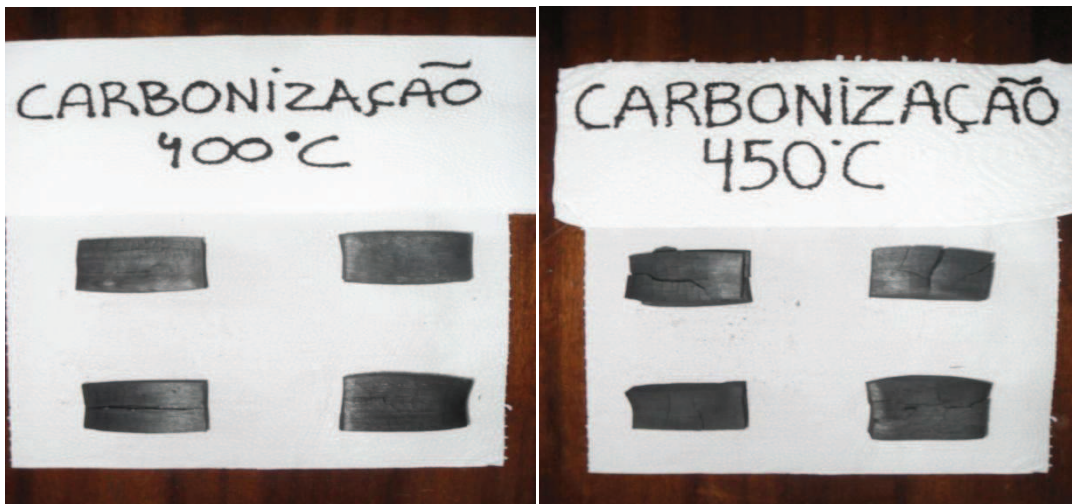
$$\text{Número de classes} = 2,5 \sqrt[4]{\text{Número de Valores da Amostra}} \quad (14)$$

### 5.2 Carbonização da Madeira

As amostras de madeira utilizadas nos ensaios de carbonização foram provenientes dos corpos-de-prova de dimensão 2x3x5 cm. Foram feitas quatro repetições para cada classe (22 – 29,1 cm, 29,2 – 36,3 cm, 36,4 – 43,5 cm, 43,6 – 50,7 cm e 50,8 – 58 cm) nas temperaturas de carbonização de 300°C (Figura 10), 350°C (Figura 11), 400°C (Figura 12), 450°C (Figura 13) e 500°C (Figura 14).



**Figura 10** – Amostras Carbonizadas a 300°C. **Figura 11** – Amostras Carbonizadas a 350°C.



**Figura 12** – Amostras Carbonizadas a 400°C. **Figura 13** – Amostras Carbonizadas a 450°C.



**Figura 14** – Amostras Carbonizadas a 500°C.

### 5.3 Propriedade da Madeira

A densidade básica da madeira é um dos mais importantes índices de qualidade, nas suas mais diversas aplicações. A importância da densidade pode ser observada desde o plantio até o processamento final da madeira. Pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) a tabela 7 mostra que a classe V apresentou uma maior média da densidade básica ( $0,63 \text{ g.cm}^3$ ), seguidas da classe I e III ( $0,62 \text{ g.cm}^3$ ), classe II ( $0,61 \text{ g.cm}^3$ ) e classe IV ( $0,59 \text{ g.cm}^3$ ) não diferindo estatisticamente entre si no teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

**Tabela 7 – Médias de cada classe da densidade básica da madeira.**

| <b>Classes</b>       | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|----------------------|-------------------------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 0.62500 <b>a</b>                    |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 0.61250 <b>a</b>                    |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 0.62250 <b>a</b>                    |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 0.59250 <b>a</b>                    |
| V (50,8 – 58 cm)     | 0.63000 <b>a</b>                    |
| <b>CV%</b>           | <b>3.16890</b>                      |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Segundo Foelkel (1978) a densidade básica está compreendida entre 0,45 e 0,65 g/cm<sup>3</sup>, onde são mais recomendadas para produção de energia. O aumento da densidade da madeira, associado a maiores teores de lignina, produz um carvão de melhor qualidade, com o aumento do rendimento gravimétrico, do teor de carbono fixo e da densidade aparente do carvão (PEREIRA et al. 2000).

A densidade básica da madeira é uma característica ideal para ser manipulada geneticamente devida à sua grande variação entre árvores, alta hereditariedade e sua baixa interação genótipo x ambiente (FERREIRA; KAGEYAMA, 1978).

Para Brito (1993) a maior densidade da madeira resulta em um carvão de maior densidade para produção de carvão e um maior rendimento em massa do carvão.

A densidade da madeira é de grande importância na produção de carvão vegetal, uma vez que para um mesmo volume de madeira pode-se obter maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal se a densidade da madeira utilizada for mais alta. (CARVÃO VEGETAL, 2003).

Para o teor de umidade da madeira pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) mostra que houve diferença significativa entre as amostras no teste de tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe IV apresentou uma maior média de teor de umidade (10,40%) diferindo de todas as classes estatisticamente. A classe III apresentou a segunda maior média de teor de umidade (10,19%), a classe V apresentou a terceira maior média de teor de umidade (10,10%) e a classe I apresentou a quarta maior média de teor de umidade (9,75%) e a classe II apresentou a pior média de teor de umidade (9,62%) diferindo estatisticamente de todas entre si conforme mostra a tabela 8.

**Tabela 8 – Médias das classes em relação ao Teor de umidade da madeira.**

| <b>Classes</b>       | <b>Teor de Umidade (%)</b> |
|----------------------|----------------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 9.75279 <b>ab</b>          |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 9.62095 <b>b</b>           |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 10.19971 <b>ab</b>         |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 10.40077 <b>a</b>          |
| V (50,8 – 58 cm)     | 10.00499 <b>ab</b>         |
| <b>CV%</b>           | <b>3.43106</b>             |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Segundo Della Lucia et al., (1992) o teor de umidade é influenciada por fatores internos (espécie da madeira, tipo de madeira e teor inicial de madeira) e fatores externos (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do ar e precipitação) podendo variar de 7,3% a 23,5% de umidade.

Segundo CUNHA et al., (1989), quanto maior o conteúdo de umidade da madeira, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia em combustão.

Analisando as propriedades químicas da serragem da madeira pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) mostra que houve diferença significativa entre as médias das amostras de serragem a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey para as classes em relação aos materiais voláteis (Tabela 9), já em relação às cinzas (Tabela 10) e carbono fixo (Tabela 11) não houve diferença significativa entre as médias pelo teste de tukey.

**Tabela 9 – Médias das classes em relação ao Material Volátil de serragem da madeira.**

| <b>Classes</b>       | <b>Materiais Voláteis (%)</b> |
|----------------------|-------------------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 86.27590 <b>ab</b>            |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 86.82608 <b>a</b>             |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 86.27344 <b>ab</b>            |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 85.83270 <b>b</b>             |
| V (50,8 – 58 cm)     | 86.81919 <b>a</b>             |
| <b>CV%</b>           | <b>0.41307</b>                |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe II apresentou o maior valor de materiais Voláteis 86,82%, contudo a média diferiu significativamente das demais, exceto da classe V 86,81%. A classe IV apresenta o menor valor de materiais voláteis 85,83%.

**Tabela 10** – Médias das classes em relação a Cinzas de serragem da madeira.

| <b>Classes</b>       | <b>Cinzas (%)</b> |
|----------------------|-------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 0.38542 a         |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 0.37736 a         |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 0.36872 a         |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 0.38228 a         |
| V (50,8 – 58 cm)     | 0.37608 a         |
| <b>CV%</b>           | <b>9.72051</b>    |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

As classes I e IV apresentaram mais valores de cinzas 0.38%, porém não diferiram estatisticamente entre si.

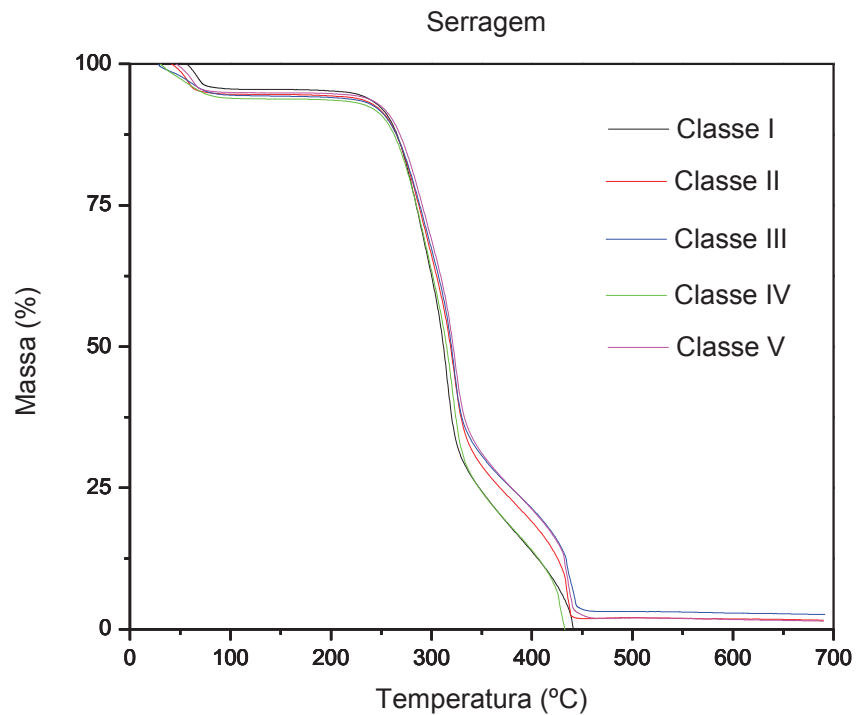
**Tabela 11** – Médias das classes em relação ao Carbono Fixo de serragem da madeira.

| <b>Classes</b>       | <b>Carbono Fixo (%)</b> |
|----------------------|-------------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 3.58500 a               |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 3.17250 a               |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 3.15750 a               |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 3.38500 a               |
| V (50,8 – 58 cm)     | 2.80250 a               |
| <b>CV%</b>           | <b>14.05995</b>         |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe I apresentou o maior valor de carbono fixo 3,58%, mas, contudo não diferiu estatisticamente das demais

Analisando a TG da serragem de madeira observou a perda de massa (%) de cada classe I, II, III, IV e V com o aumento da temperatura mostra qual foi à faixa de temperatura e quanto dessa perda que ficou para cada propriedade química da madeira (Figura 15).



**Figura 15** – Curvas de TG da serragem de eucalipto por classe, em atmosfera de ar sintético.

Analisando as curvas de TG da serragem observa que todas as classes estão bem próximas e estáveis.

As curvas de TG proporcionam uma compreensão semi-quantitativa dos processos de degradação térmica que ocorrem durante a conversão termoquímica indicado por várias atmosferas (GONZALES et al., 2009).

A tabela 12 mostra a perda de massa em relação às propriedades químicas do carvão vegetal pela análise termogravimétrica

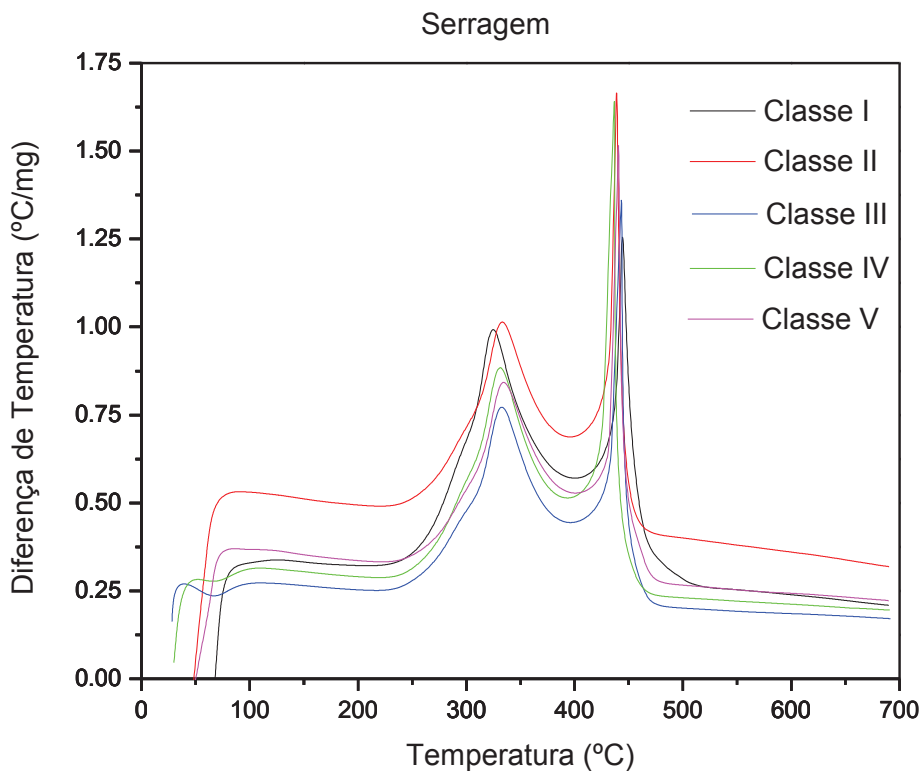
**Tabela 12** – Perda de massa das características químicas de serragem da madeira pela TG de cada classe.

| <b>CLASSES</b> | <b>% UMIDADE</b> | <b>% MATERIAIS VOLÁTEIS</b> | <b>% CARBONO FIXO</b> | <b>% CINZAS</b> |
|----------------|------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|
| Classe I       | 4,73             | 61,49                       | 33,78                 | 0               |
| Classe II      | 5,72             | 60,03                       | 32,15                 | 2,10            |
| Classe III     | 6,03             | 57,51                       | 32,87                 | 3,59            |
| Classe IV      | 6,35             | 63,65                       | 30                    | 0               |
| Classe V       | 5,19             | 58,31                       | 34,36                 | 2,13            |

Os valores obtidos no trabalho nas características de serragem da madeira de eucalipto estão bem próximos e na faixa de variação dos valores encontrados na

literatura para todas as classes, e cada uma dessas características químicas tem grande importância para produção de energia.

Analisando a DTA da serragem de madeira, mostra que a classe II apresenta um maior pico tanto no primeiro como no segundo evento térmico exotérmico. Isto significa um maior poder calorífico superior que resulta num maior poder de combustão (Pirólise), muito importante para produção de energia (Figura 16).



**Figura 16** – Curvas de DTA da serragem de eucalipto por classe, em atmosfera de ar sintético.

O primeiro pico exotérmico se refere à queima de materiais voláteis com um poder calorífico médio de 1,62 MJ/Kg ou 387,86 Kcal/Kg e o segundo pico se refere a queima de carbono fixo gerando um poder calorífico médio de 1,42 MJ/Kg ou 340,21 Kcal/Kg.

A tabela 13 mostra o poder calorífico em relação à queima de voláteis e carbono fixo para todas as classes pela análise DTA.



**Tabela 13** – Poder Calorífico estimado pela Análise Térmica (DTA), com a Queima de Materiais Voláteis e Carbono Fixo para cada classe de serragem da madeira.

| <b>CLASSES</b> | <b>Queima de Voláteis<br/>(MJ/Kg ou Kcal/Kg)</b> | <b>Queima de Carbono Fixo<br/>(MJ/Kg ou Kcal/Kg)</b> |
|----------------|--|--|
| Classe I       | 1,99 ou 477,45                                   | 1,34 ou 321,65                                       |
| Classe II      | 1,85 ou 442,90                                   | 1,80 ou 431,07                                       |
| Classe III     | 1,20 ou 287,07                                   | 1,15 ou 276,40                                       |
| Classe IV      | 1,53 ou 365,84                                   | 1,42 ou 341,34                                       |
| Classe V       | 1,53 ou 366,63                                   | 1,38 ou 330,60                                       |

A análise DTA da serragem de eucalipto mostra que na faixa de temperatura de 300°C a 400°C ocorre à queima de materiais voláteis e na faixa de temperatura de 400°C a 500°C ocorre à queima de carbono fixo.

Na classe I apresenta um maior valor na queima de materiais voláteis e na classe II apresenta um maior valor na queima de carbono fixo.

#### 5.4 Propriedades do Carvão

As propriedades do carvão vegetal estão diretamente relacionadas às características físicas, químicas e anatômicas da madeira utilizada na sua produção. Entre todas as características físicas da madeira, a densidade básica é a que tem maior influência sobre a qualidade do carvão e entre as características químicas o destaque é para o teor de lignina (TURGILHO et al., 1999).

De acordo com Almeida e Resende (1982), o carvão vegetal pode ser considerado a partir de temperaturas acima de 300° C.

Analisando a densidade do carvão pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) em Arranjo Fatorial mostra que houve diferença significativa entre as médias das amostras de carvão vegetal a 1% de probabilidade pelo teste de tukey para as classes (Tabela 14) temperaturas (Tabela 15) e a interação entre os dois fatores (Tabela 16).

**Tabela 14** - Médias das classes em relação à densidade do carvão vegetal.

| <b>Classes</b>       | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|----------------------|-------------------------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 0.34274 <b>a</b>                    |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 0.33893 <b>a</b>                    |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 0.34762 <b>a</b>                    |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 0.32415 <b>b</b>                    |
| V (50,8 – 58 cm)     | 0.33803 <b>ab</b>                   |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe I, II e III apresenta as maiores médias de densidade ( $0,34\text{g/cm}^3$ ), mas não diferem estatisticamente entre si. A classe IV apresenta uma média de ( $0,32\text{g/cm}^3$ ) e a classe V apresenta uma média de ( $0,33\text{g/cm}^3$ ) sendo menor valor.

**Tabela 15** - Médias das temperaturas em relação à densidade do carvão vegetal.

| Temperaturas | Densidade ( $\text{g/cm}^3$ ) |
|--------------|-------------------------------|
| 300°C        | 0.57557 <b>a</b>              |
| 350°C        | 0.30794 <b>b</b>              |
| 400°C        | 0.28198 <b>c</b>              |
| 450°C        | 0.27018 <b>c</b>              |
| 500°C        | 0.25581 <b>d</b>              |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Na temperatura de 300°C apresenta o maior valor de densidade (0,57%) diferindo estatisticamente de todas as temperaturas entre si. Nas temperaturas de 400°C e 450°C as densidades não diferem estatisticamente entre si variando de ( $0,28\text{g/cm}^3$  e  $0,27\text{g/cm}^3$ ) e a menor densidade está na temperatura de 500°C ( $0,25\text{g/cm}^3$ ).

**Tabela 16** – Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação à densidade do carvão vegetal.

| Classes (cm) | Temperaturas      |                  |                   |                  |                  |
|--------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|
|              | 300°C             | 350°C            | 400°C             | 450°C            | 500°C            |
| <b>I</b>     | 0.5987 <b>aA</b>  | 0.3109 <b>aB</b> | 0.2862 <b>aBC</b> | 0.2599 <b>aC</b> | 0.2581 <b>aC</b> |
| <b>II</b>    | 0.5859 <b>abA</b> | 0.3067 <b>aB</b> | 0.2764 <b>aBC</b> | 0.2746 <b>aC</b> | 0.2511 <b>aC</b> |
| <b>III</b>   | 0.6152 <b>aA</b>  | 0.3094 <b>aB</b> | 0.2806 <b>aBC</b> | 0.2760 <b>aC</b> | 0.2569 <b>aC</b> |
| <b>IV</b>    | 0.5108 <b>cA</b>  | 0.3034 <b>aB</b> | 0.2852 <b>aBC</b> | 0.2650 <b>aC</b> | 0.2564 <b>aC</b> |
| <b>V</b>     | 0.5672 <b>bA</b>  | 0.3094 <b>aB</b> | 0.2815 <b>aBC</b> | 0.2755 <b>aC</b> | 0.2565 <b>aC</b> |

CV% = 4.70334

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Classificação com letras minúsculas na linha e classificação com letras maiúsculas na coluna.

A interação das médias das classes com as médias das temperaturas teve uma maior densidade na temperatura 300°C, onde a classe III apresentou  $0,61\text{g/cm}^3$  tendo a maior densidade. As menores densidades estão nas classes que ficam na faixa de temperatura 500°C. A diminuição da densidade é devida ao aumento da porosidade do carvão com o aumento da temperatura de carbonização.

A densidade tem sido citada, por diversos autores como um dos parâmetros mais importantes em termos da determinação da qualidade do carvão vegetal e têm

reportado o estudo das correlações entre a densidade do carvão vegetal e a densidade da madeira que o originou (DOAT; PETROFF 1978).

Segundo Gomes e Oliveira (1980) no caso da utilização do carvão vegetal em siderurgia, a densidade é uma propriedade bastante importante, pois, ela determina o volume ocupado pelo redutor no alto forno. Não havendo prejuízo para as outras propriedades, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível. A determinação da densidade do carvão vegetal é uma prática recomendada sob o aspecto da utilização industrial.

Analisando o teor de umidade pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) em Arranjo Fatorial mostra que houve diferença significativa entre as médias das amostras de carvão vegetal a 1% de probabilidade pelo teste de tukey para as classes (Tabela 17). Já em relação às temperaturas não houve diferença significativa entre as médias das amostras (Tabela 18). Entre os dois fatores houve diferença significativa a 5% de probabilidade pelo teste de tukey entre as médias das amostras (Tabela 19).

**Tabela 17** - Médias das classes em relação ao teor de umidade do carvão vegetal.

| <b>Classes</b>       | <b>Teor de Umidade (%)</b> |
|----------------------|----------------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 3.79494 <b>c</b>           |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 5.29506 <b>b</b>           |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 6.26761 <b>a</b>           |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 6.34224 <b>a</b>           |
| V (50,8 – 58 cm)     | 6.30866 <b>a</b>           |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe IV apresenta o maior teor de umidade 6,34% mas não difere estatisticamente da classe III e V. A classe I apresenta o menor teor de umidade 3,79%. O aumento de teor de umidade está relacionado ao aumento da porosidade do carvão com o aumento da temperatura de carbonização. Quanto maior o teor de poros, mais umidade pode ser absorvida pelo carvão após a carbonização.

**Tabela 18** - Médias das temperaturas em relação ao teor de umidade do carvão vegetal.

| <b>Temperaturas</b> | <b>Teor de Umidade (%)</b> |
|---------------------|----------------------------|
| 300°C               | 5.59204 <b>a</b>           |
| 350°C               | 5.58792 <b>a</b>           |
| 400°C               | 5.64588 <b>a</b>           |

|       |           |
|-------|-----------|
| 450°C | 5.60569 a |
| 500°C | 5.57697 a |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Em relação às temperaturas o teor de umidade não difere estatisticamente entre si.

**Tabela 19** - Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação ao teor de umidade do carvão vegetal.

| Classes (cm) | Temperaturas |            |           |           |            |
|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|------------|
|              | 300°C        | 350°C      | 400°C     | 450°C     | 500°C      |
| I            | 3.8883 dA    | 3.7936 cA  | 3.7252 cA | 3.6788 cA | 3.8887 cA  |
| II           | 5.4103 cA    | 5.3023 bA  | 5.3405 bA | 5.2081 bA | 5.2141 bA  |
| III          | 6.0022 bB    | 6.1874 aAB | 6.4137 aA | 6.4893 aA | 6.2454 aAB |
| IV           | 6.4077 aA    | 6.2496 aA  | 6.4117 aA | 6.3636 aA | 6.2786 aA  |
| V            | 6.2516 abA   | 6.4066 aA  | 6.3383 aA | 6.2887 aA | 6.2581 aA  |

CV% = 3.24539

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Classificação com letras minúsculas na linha e classificação com letras maiúsculas na coluna.

Segundo Cotta (1996), a fabricação de carvão com madeira úmida, origina um carvão friável e quebradiço, provocando a elevação do teor de fino durante o manuseio e transporte e aconselha carbonizar a madeira com umidade, base seca, entre 20-30%.

Teor de umidade elevado, principalmente na região central da madeira, cerne, inevitavelmente provocará fendilhamento no carvão vegetal, predispondo a maior geração de finos, fato ocasionado pelo aumento da pressão de vapor por ocasião da transformação da madeira em carvão vegetal (COTTA, 1996).

Analisando os materiais voláteis do carvão vegetal pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) em Arranjo Fatorial mostra que houve diferença significativa entre as médias das amostras de carvão vegetal a 1% de probabilidade pelo teste de tukey tanto para as classes, temperaturas e entre os dois fatores conforme mostra a tabela 20, 21 e 22.

**Tabela 20** - Médias das classes em relação ao material volátil do carvão vegetal.

| Classes              | Materiais Voláteis (%) |
|----------------------|------------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 46.37113 c             |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 49.01401 b             |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 48.27204 b             |

|                     |            |
|---------------------|------------|
| IV (43,6 – 50,7 cm) | 51.19137 a |
| V (50,8 – 58 cm)    | 51.34087 a |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe V apresenta o maior teor de voláteis 51,34% mas não difere estatisticamente entre a classe IV 51,19%. Já em relação às outras classes a classe II e III não difere estatisticamente entre si, mas diferem da classe I. A classe I, II e III apresentam os seguintes teores de materiais voláteis: 46,37%, 49,01% e 48,27%.

**Tabela 21** - Médias das temperaturas em relação ao material volátil do carvão vegetal.

| Temperaturas | Materiais Voláteis (%) |
|--------------|------------------------|
| 300°C        | 80.15667 a             |
| 350°C        | 54.46355 b             |
| 400°C        | 40.24371 c             |
| 450°C        | 36.98075 d             |
| 500°C        | 34.34473 e             |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Analisando as temperaturas em relação ao teor de materiais voláteis houve diferença estatisticamente entre todas as temperaturas. Na temperatura de 300° C é o maior valor 80,15% e o menor valor 34,34% de materiais voláteis. Pela análise estatística tem uma tendência da diminuição do teor de materiais voláteis em relação com o aumento da temperatura.

**Tabela 22** - Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação aos materiais voláteis do carvão vegetal.

| Classes (cm) | Temperaturas |            |             |            |             |
|--------------|--------------|------------|-------------|------------|-------------|
|              | 300°C        | 350°C      | 400°C       | 450°C      | 500°C       |
| I            | 78.4483 bA   | 45.3041 eB | 42.6005 aC  | 33.4147 cD | 32.0881 cD  |
| II           | 79.4543 bA   | 51.7973 cB | 41.1958 abC | 37.8687 aD | 34.7539 bE  |
| III          | 84.8796 aA   | 49.5440 dB | 38.9715 cdC | 35.7029 bD | 32.2623 cE  |
| IV           | 78.3798 bA   | 63.9707 aB | 38.1437 dC  | 38.4772 aC | 36.9854 aC  |
| V            | 79.6213 bA   | 61.7016 bB | 40.3070 bcC | 39.4404 aC | 35.6340 abD |

CV% = 1.96638

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Classificação com letras minúsculas na linha e classificação com letras maiúsculas na coluna.

O teor de materiais voláteis é influenciado pela temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da madeira, sendo a temperatura o

principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão (CARMO, 1988).

A interação das classes com as temperaturas diferem estatisticamente entre si. Na temperatura 300°C obteve-se um carvão com maior teor de materiais voláteis, sendo a classe III o maior valor 84,87%. A classe I apresenta o menor valor 32,08% na temperatura de 500°C. Observa-se que com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição dos materiais voláteis. Isso mostra que a taxa de aquecimento e a temperatura são fatores muito importante para o controle da carbonização.

Analisando as cinzas do carvão vegetal pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) em Arranjo Fatorial mostra que houve diferença significativa entre as médias das amostras de carvão vegetal a 1% de probabilidade pelo teste de tukey tanto para as classes, temperaturas e entre os dois fatores conforme mostra a tabela 23, 24 e 25.

**Tabela 23** - Médias das classes em relação a cinzas do carvão vegetal.

| <b>Classes</b>       | <b>Cinzas (%)</b> |
|----------------------|-------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 1.85722 <b>c</b>  |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 2.12026 <b>a</b>  |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 1.95517 <b>bc</b> |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 1.99079 <b>b</b>  |
| V (50,8 – 58 cm)     | 1.87793 <b>bc</b> |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe II apresentou o maior teor de cinzas 2,12% diferindo estatisticamente de todas as classes. A classe IV apresenta o segundo maior valor 1,99%. A classe III e V não diferem estatisticamente entre si e a classe I apresenta o menor valor 1,85%.

**Tabela 24** - Médias das temperaturas em relação a cinzas do carvão vegetal.

| <b>Temperaturas</b> | <b>Cinzas (%)</b> |
|---------------------|-------------------|
| 300°C               | 0.80983 <b>e</b>  |
| 350°C               | 1.69792 <b>d</b>  |
| 400°C               | 1.98016 <b>c</b>  |
| 450°C               | 2.53635 <b>b</b>  |
| 500°C               | 2.77712 <b>a</b>  |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A temperatura de 500°C apresenta o maior teor de cinzas 2,77% diferindo de todas estatisticamente. Na temperatura de 450°C apresenta o segundo maior valor de cinzas 2,53%. Na temperatura de 300°C é o que apresenta o pior valor 0,80% de materiais voláteis. Podemos observar que com o aumento da temperatura ocorre o aumento do teor de cinzas.

**Tabela 25** - Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação à cinza do carvão vegetal.

| Classes (cm) | Temperaturas |           |           |           |            |
|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|              | 300°C        | 350°C     | 400°C     | 450°C     | 500°C      |
| I            | 0.8028 aE    | 2.0348 aC | 1.4662 bD | 2.3496 bB | 2.6327 bA  |
| II           | 0.8024 aD    | 1.8293 aC | 2.2715 aB | 2.7650 aA | 2.9331 aA  |
| III          | 0.8181 aE    | 1.9899 aC | 1.6750 bD | 2.3597 bB | 2.9331 aA  |
| IV           | 0.8161 aD    | 1.4332 bC | 2.2577 aB | 2.8558 aA | 2.5912 bA  |
| V            | 0.8096 aD    | 1.2024 bC | 2.2304 aB | 2.3517 bB | 2.7956 abA |

CV% = 7.15315

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Classificação com letras minúsculas na linha e classificação com letras maiúsculas na coluna.

Na temperatura de 500°C apresenta um maior teor de cinzas em relação às médias tanto para a classe II como na III. Observa-se que com o aumento da temperatura ocorre um aumento do teor de cinzas e nota-se que existe uma correlação com a influência da temperatura nas classes diferindo estatisticamente entre si.

Analisando o carbono fixo do carvão vegetal pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) em Arranjo Fatorial mostra que houve diferença significativa entre as médias das amostras de carvão vegetal a 1% de probabilidade pelo teste de tukey tanto para as classes, temperaturas e entre o dois fatores conforme mostra a tabela 26, 27 e 28.

**Tabela 26** - Médias das classes em relação ao carbono fixo do carvão vegetal.

| Classes              | Carbono Fixo (%) |
|----------------------|------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 46.17961 a       |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 43.31201 b       |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 44.12690 b       |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 41.21215 c       |
| V (50,8 – 58 cm)     | 41.20422 c       |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe I apresenta o maior teor de carbono fixo 46,16% diferindo estatisticamente de todas as classes. As classes II e III não diferem estatisticamente entre si, mesma coisa acontece com as classes IV e V as quais apresentam os menores valores de carbono fixo 41,21% e 41,20%.

**Tabela 27** - Médias das temperaturas em relação ao carbono fixo do carvão vegetal.

| <b>Temperaturas</b> | <b>Carbono Fixo (%)</b> |
|---------------------|-------------------------|
| 300°C               | 15.23856 <b>e</b>       |
| 350°C               | 38.54347 <b>d</b>       |
| 400°C               | 51.50853 <b>c</b>       |
| 450°C               | 54.14066 <b>b</b>       |
| 500°C               | 56.60368 <b>a</b>       |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Todas as temperaturas diferem entre si estatisticamente. Na temperatura de 500°C apresenta o maior teor de carbono fixo 56,60%. Na temperatura de 300°C apresenta o menor valor de carbono fixo 15,23%.

**Tabela 28** - Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação ao carbono fixo do carvão vegetal.

| <b>Classes (cm)</b> | <b>Temperaturas</b> |                   |                    |                   |                    |
|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
|                     | <b>300°C</b>        | <b>350°C</b>      | <b>400°C</b>       | <b>450°C</b>      | <b>500°C</b>       |
| <b>I</b>            | 16.8605 <b>aD</b>   | 47.2507 <b>aC</b> | 49.9311 <b>cB</b>  | 57.8280 <b>aA</b> | 59.0276 <b>aA</b>  |
| <b>II</b>           | 15.9496 <b>aE</b>   | 41.0710 <b>cD</b> | 50.3453 <b>cC</b>  | 53.1167 <b>cB</b> | 56.0774 <b>bA</b>  |
| <b>III</b>          | 10.5770 <b>bE</b>   | 43.1256 <b>bD</b> | 52.9398 <b>abC</b> | 55.5257 <b>bB</b> | 58.4664 <b>aA</b>  |
| <b>IV</b>           | 17.1253 <b>aC</b>   | 29.3881 <b>eB</b> | 53.1093 <b>aA</b>  | 52.3035 <b>cA</b> | 54.1346 <b>cA</b>  |
| <b>V</b>            | 15.6803 <b>aD</b>   | 31.8819 <b>dC</b> | 51.2171 <b>bcB</b> | 51.9294 <b>cB</b> | 55.3124 <b>bcA</b> |

CV% = 2.21110

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Classificação com letras minúsculas na linha e classificação com letras maiúsculas na coluna.

Na temperatura de 500°C apresenta uma maior média de carbono fixo em relação às outras temperaturas. A classe I apresenta o maior valor de carbono fixo 59,02% a 500°C e a pior média classe III 10,57 % a 300°C.

Segundo dados da literatura, os resultados obtidos quanto aos teores de materiais voláteis e de carbono fixo, estão na faixa de valores para carvão provenientes de madeiras de diferentes espécies e clones de eucalipto, que vão de



18 a 23,50% para materiais voláteis, 70 a 81% para carbono fixo e as cinzas (material inorgânico) de 1 a 3% (TRUGILHO et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2006).

Os resultados obtidos no trabalho mostram uma tendência com o aumento da temperatura ocorre um aumento de cinzas e carbono fixo e uma diminuição de materiais voláteis. Essa tendência mostra quanto maior for o teor de carbono fixo melhor serão as qualidades do carvão por consequência são importantes para geração de energia.

Analisando o rendimento gravimétrico pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) em Arranjo Fatorial mostra que em relação às classes houve diferença significativa entre as médias das amostras ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de tukey (Tabela 29). Já em relação às temperaturas houve diferença significativa entre as médias das amostras ao nível de 5 % de probabilidade (Tabela 30). A interação dos dois fatores entre as médias das amostras não diferiu significativa pelo teste de tukey (Tabela 31).

**Tabela 29** – Médias das classes em relação ao Rendimento Gravimétrico do carvão vegetal.

| <b>Classes</b>       | <b>Rendimento Gravimétrico (%)</b> |
|----------------------|------------------------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 36.73069 a                         |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 36.68420 a                         |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 37.51251 a                         |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 38.05927 a                         |
| V (50,8 – 58 cm)     | 37.93704 a                         |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe IV apresentou o maior rendimento gravimétrico 38,05% mas não diferiu estatisticamente entre os outros e a classe II apresentou a menor média 36,68%. Nota-se que não havendo interferência da temperatura entre as classes o rendimento gravimétrico não terá diferença estatisticamente entre si.

O rendimento na produção de carvão é maximizado com o uso de madeira mais densa, de maior poder calorífico e constituição química adequada resultando também em um carvão de melhor qualidade (PALUDZYSYN FILHO, 2008).

**Tabela 30** - Médias das temperaturas em relação ao Rendimento Gravimétrico do carvão vegetal.

| <b>Temperaturas</b> | <b>Rendimento Gravimétrico %</b> |
|---------------------|----------------------------------|
|---------------------|----------------------------------|

|       |            |
|-------|------------|
| 300°C | 73.21535 a |
| 350°C | 35.56309 b |
| 400°C | 30.21443 c |
| 450°C | 26.25739 d |
| 500°C | 21.67345 e |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Segundo Trugilho e Silva (2001), estes valores de rendimentos elevados podem ser explicados pela degradação térmica incompleta do material, sendo esta hipótese reforçada pelos baixos valores de carbono fixo, poder calorífico superior e altos teores de materiais voláteis observados.

Na temperatura de 300°C apresentou o maior rendimento gravimétrico 73,21% diferindo estatisticamente entre as outras temperaturas. O menor rendimento gravimétrico foi de 21,67% na temperatura de 500°C. Observa-se pela análise que com o aumento de temperatura existe uma tendência da diminuição do rendimento gravimétrico que tem como relação o peso de carvão seco pelo peso da madeira seca.

Syred et al. (2006), concluíram que o aumento da temperatura de carbonização causa diminuição do rendimento gravimétrico em carvão, e aumento da concentração do carbono fixo na fração sólida, confirmando os resultados encontrados no presente estudo.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal na faixa de 25% é obtido nos fornos tradicionais o que representam uma perda econômica expressiva da lenha carbonizada (PIMENTA, 2002).

**Tabela 31** - Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação ao Rendimento Gravimétrico do carvão vegetal.

| Classes (cm) | Temperaturas |         |         |         |         |
|--------------|--------------|---------|---------|---------|---------|
|              | 300°C        | 350°C   | 400°C   | 450°C   | 500°C   |
| I            | 72.0437      | 35.4327 | 29.0060 | 25.8160 | 21.3550 |
| II           | 72.4895      | 34.7869 | 29.2817 | 25.8647 | 20.9981 |
| III          | 75.2172      | 33.8227 | 29.7342 | 26.6832 | 22.1052 |
| IV           | 72.3426      | 36.9297 | 32.3423 | 26.3898 | 22.2920 |
| V            | 73.9837      | 36.8434 | 30.7079 | 26.5333 | 21.6169 |

CV% = 4.85

Não foi aplicado o teste de comparação de média por que o F de interação não foi significativo.

A interação entre as médias das classes e temperaturas não teve diferença estatisticamente entre si. Mas podemos notar que com o aumento da temperatura a relação entre os dois fatores tendem a diminuir.

Segundo os autores como Oliveira et al. (1989) e Vale et al. (1997), ao estudarem o *Eucalyptus grandis*, espécie mais utilizada como matérias-primas para carvão vegetal, encontraram valores de 35% e 33% de rendimento gravimétrico, respectivamente, próximos aos que foram encontrados neste trabalho.

Analisando o Rendimento Carbono Fixo pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) em Arranjo Fatorial mostra que em relação às classes (Tabela 32), temperaturas (Tabela 33) e a interação entre os dois fatores (Tabela 34) houve diferença significativa entre as médias das amostras ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de tukey.

**Tabela 32 – Médias das classes em relação ao Rendimento Carbono Fixo do carvão vegetal.**

| <b>Classes</b>       | <b>Rendimento Carbono Fixo %</b> |
|----------------------|----------------------------------|
| I (22 – 29,1 cm)     | 14.18248 <b>a</b>                |
| II (29,2 – 36,3 cm)  | 13.21818 <b>b</b>                |
| III (36,4 – 43,5 cm) | 13.20947 <b>b</b>                |
| IV (43,6 – 50,7 cm)  | 13.26097 <b>b</b>                |
| V (50,8 – 58 cm)     | 12.95878 <b>b</b>                |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A classe I apresenta o maior rendimento de carbono fixo 14,18% diferindo das outras classes estatisticamente. As classes II 13,21%, III 13,20%, IV 13,26% e V 12,95% não diferem estatisticamente entre si.

O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira e inversamente proporcional ao teor de holocelulose.

**Tabela 33 - Médias das temperaturas em relação ao Rendimento Carbono Fixo do carvão vegetal.**

| <b>Temperaturas</b> | <b>Rendimento carbono Fixo %</b> |
|---------------------|----------------------------------|
| 300°C               | 11.12856 <b>d</b>                |
| 350°C               | 13.64348 <b>b</b>                |
| 400°C               | 15.57209 <b>a</b>                |
| 450°C               | 14.21669 <b>b</b>                |
| 500°C               | 12.26906 <b>c</b>                |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A temperatura de 400°C apresenta o maior rendimento de carbono fixo 15,57% diferindo estatisticamente de todas as temperaturas. As temperaturas 350°C 13,64% e 450°C 14,21% não diferem estatisticamente entre si. A temperatura de 300°C apresenta o menor rendimento de carbono fixo 11,12%.

**Tabela 34** - Interação entre as médias das classes e temperaturas em relação ao Rendimento Carbono Fixo do carvão vegetal.

| Classes | Temperaturas |             |             |             |             |
|---------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|         | 300°C        | 350°C       | 400°C       | 450°C       | 500°C       |
| I       | 12.1456 aC   | 16.7458 aA  | 14.4804 bB  | 14.9325 aAB | 12.6082 aC  |
| II      | 11.5598 aB   | 14.2788 bA  | 14.7339 bA  | 13.7390 aA  | 11.7795 aB  |
| III     | 7.9552 bC    | 14.5995 bAB | 15.7419 abA | 14.8212 aA  | 12.9295 aB  |
| IV      | 12.3880 aBC  | 10.8469 cC  | 17.1832 aA  | 13.8128 aB  | 12.0739 aBC |
| V       | 11.5941 aC   | 11.7464 cC  | 15.7211 abA | 13.7780 aB  | 11.9544 aBC |

CV% = 7.01

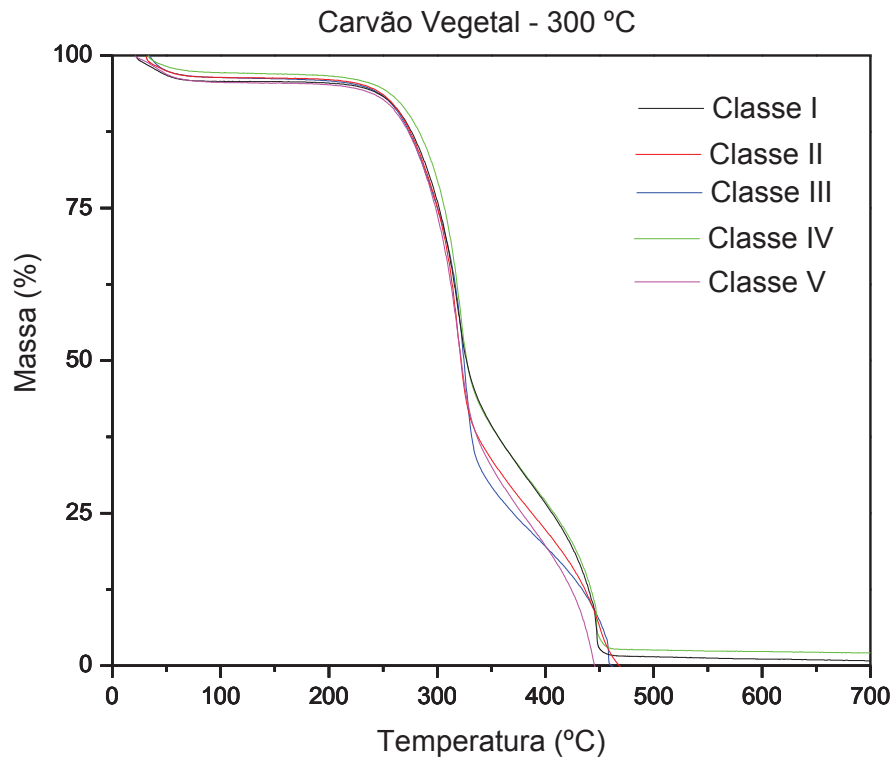
As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A interação entre as classes e temperaturas mostra um maior rendimento de carbono fixo na temperatura de 400°C na classe IV 17,18% e um menor rendimento na temperatura de 300°C na classe III 7,95%.

Analisando a TG do carvão vegetal observou a perda de massa (%) de cada classe I, II, III, IV e V com o aumento da temperatura e qual foi à faixa de temperatura e o quanto dessa perda ficou para essas classes das amostras carbonizadas nas temperaturas 300°C (Figura 17), 350°C (Figura 18), 400°C (Figura 19), 450°C (Figura 20) e 500°C (Figura 21) para cada propriedade química do carvão vegetal.

Oliveira e Silva (2003), ao estudarem o comportamento das curvas termogravimétricas da madeira de Eucalipto observaram que a degradação térmica teve início a 150°C de temperatura, sendo essa mais pronunciada na faixa entre 250 e 450°C, tendo como redução as características químicas do carvão vegetal conforme mostram as tabelas 35, 36, 37, 38 e 39.

Campos (2009), ao estudar o comportamento térmico da madeira de eucalipto, por meio da análise termogravimétrica, observou uma faixa de maior degradação térmica da madeira entre 250 e 400°C.



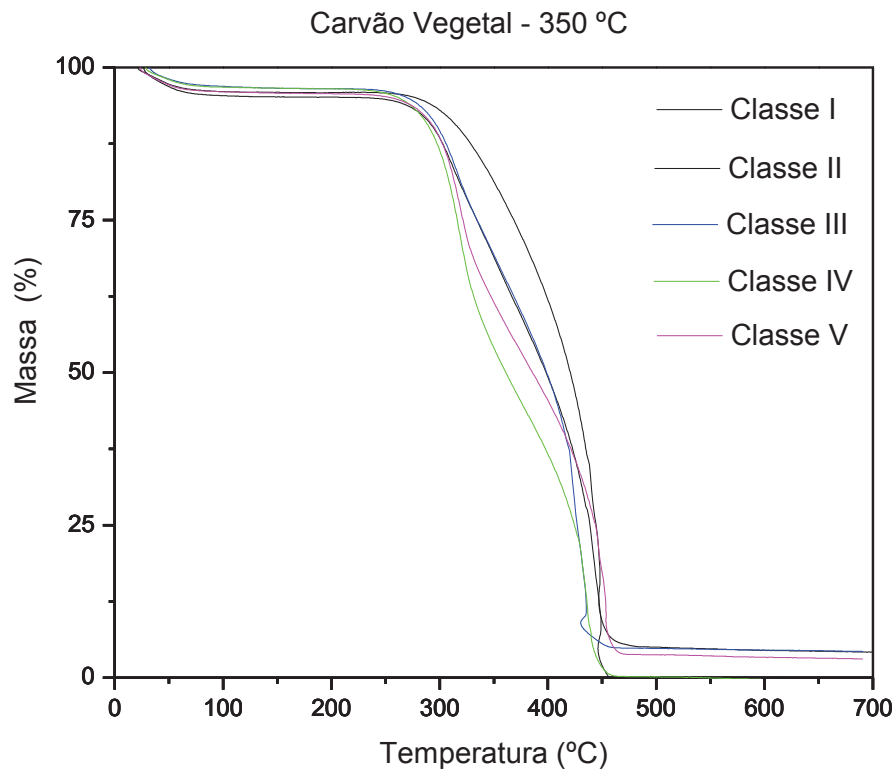
**Figura 17** – Curvas de TG do carvão vegetal a 300°C por classe em atmosfera de ar sintético.

A tabela 35 mostra a perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela análise termogravimétrica TG carbonizadas a 300° C.

**Tabela 35** – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela TG de cada classe.

| CLASSES    | % UMIDADE | % MATERIAIS VOLÁTEIS | % CARBONO FIXO | % CINZAS |
|------------|-----------|----------------------|----------------|----------|
| Classe I   | 4,63      | 64,33                | 29,35          | 1,69     |
| Classe II  | 4,17      | 68,51                | 27,32          | 0        |
| Classe III | 4,25      | 73,63                | 22,12          | 0        |
| Classe IV  | 3,62      | 63,41                | 30,23          | 2,74     |
| Classe V   | 4,58      | 70,72                | 24,70          | 0        |

Os valores obtidos no trabalho nas características do carvão vegetal estão bem próximos e na faixa de variação dos valores encontrados na literatura para todas as classes, e cada uma dessas características químicas tem grande importância para produção de energia.



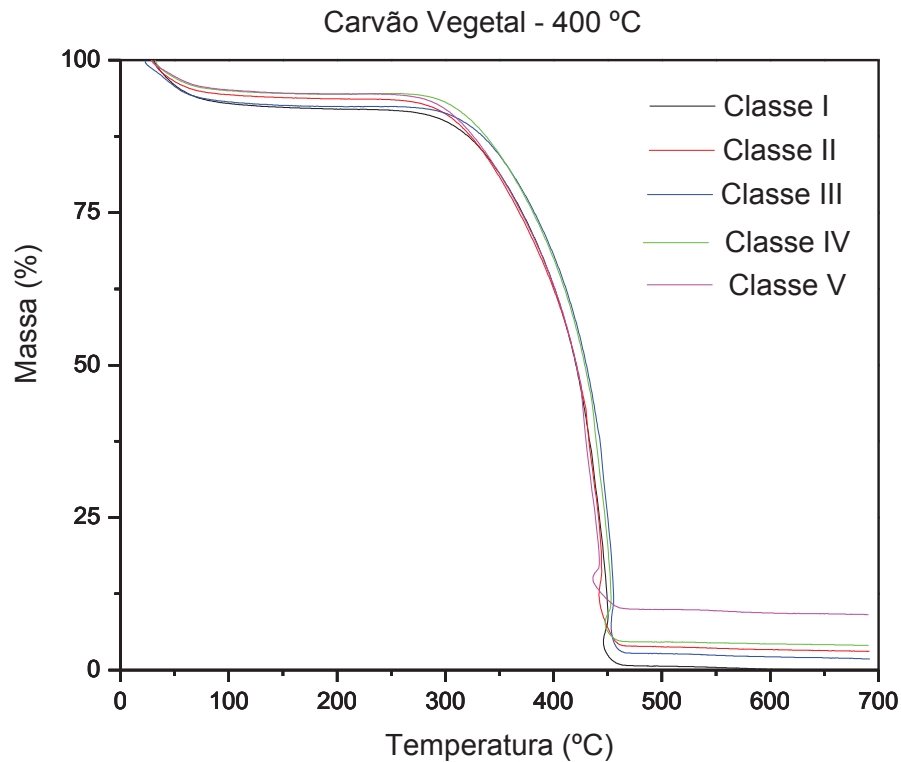
**Figura 18** – Curvas de TG do carvão vegetal a 350°C por classe em atmosfera de ar sintético.

A tabela 36 mostra a perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela análise termogravimétrica TG carbonizadas a 350° C.

**Tabela 36** – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela TG de cada classe.

| CLASSES    | % UMIDADE | % MATERIAIS VOLÁTEIS | % CARBONO FIXO | % CINZAS |
|------------|-----------|----------------------|----------------|----------|
| Classe I   | 4,08      | 30,45                | 60,14          | 5,33     |
| Classe II  | 4,86      | 30,29                | 64,85          | 0        |
| Classe III | 3,52      | 32,84                | 58,71          | 4,93     |
| Classe IV  | 3,52      | 51,50                | 44,98          | 0        |
| Classe V   | 4,30      | 42,65                | 49,22          | 3,83     |

Os valores obtidos no trabalho nas características do carvão vegetal estão bem próximos e na faixa de variação dos valores encontrados na literatura para todas as classes, e cada uma dessas características químicas tem grande importância para produção de energia



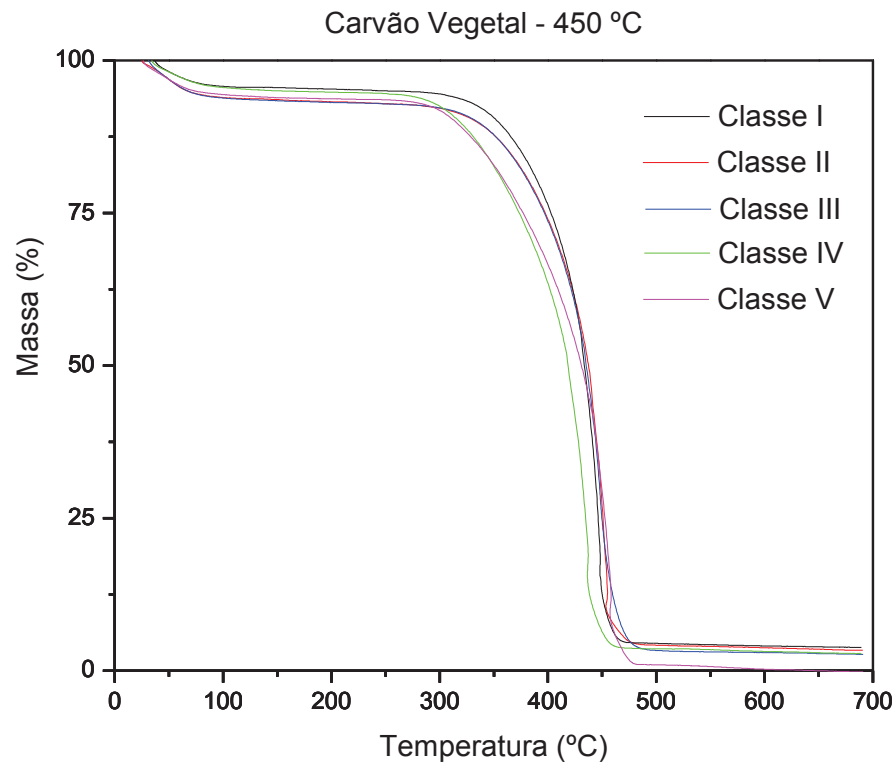
**Figura 19** – Curvas de TG do carvão vegetal a 400°C por classe em atmosfera de ar sintético.

A tabela 37 mostra a perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela análise termogravimétrica TG carbonizadas a 400° C.

**Tabela 37** – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela TG de cada classe.

| <b>CLASSES</b> | <b>% UMIDADE</b> | <b>% MATERIAIS VOLÁTEIS</b> | <b>% CARBONO FIXO</b> | <b>% CINZAS</b> |
|----------------|------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|
| Classe I       | 8,40             | 26,79                       | 64,82                 | 0               |
| Classe II      | 6,44             | 27,46                       | 61,94                 | 4,16            |
| Classe III     | 7,62             | 30,69                       | 58,83                 | 2,86            |
| Classe IV      | 5,59             | 26,94                       | 62,79                 | 4,68            |
| Classe V       | 5,70             | 24,68                       | 58,59                 | 11,04           |

Os valores obtidos no trabalho nas características do carvão vegetal estão bem próximos e na faixa de variação dos valores encontrados na literatura para todas as classes, e cada uma dessas características químicas tem grande importância para produção de energia.



**Figura 20** – Curvas de TG do carvão vegetal a 450°C por classe em atmosfera de ar sintético.

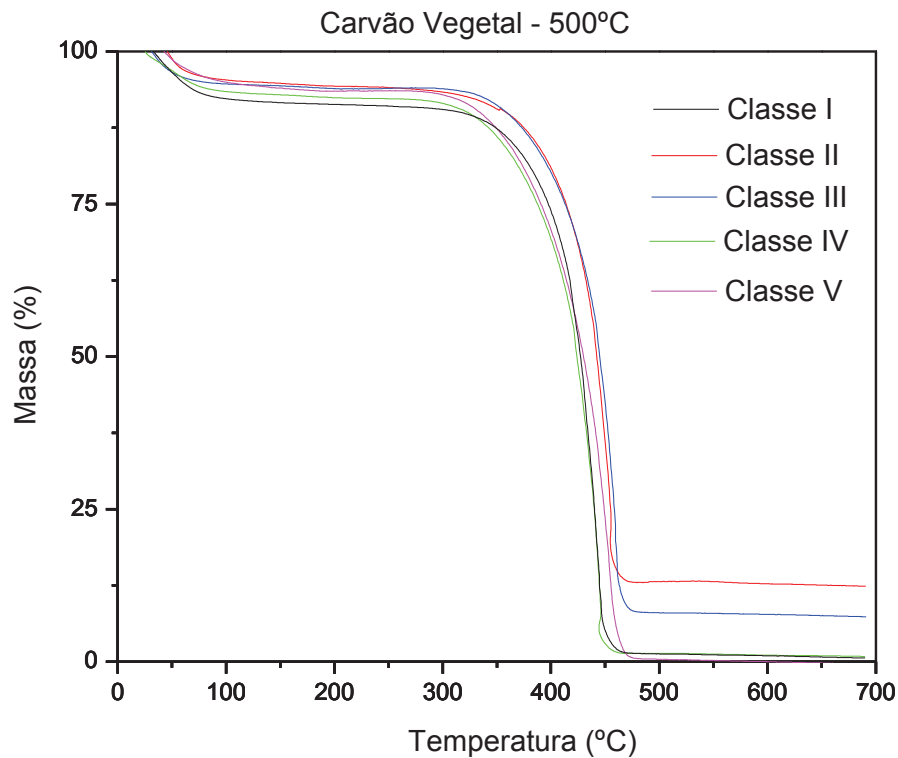
A tabela 38 mostra a perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela análise termogravimétrica TG carbonizadas a 450° C.

**Tabela 38** – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela TG de cada classe.

| CLASSES    | % UMIDADE | % MATERIAIS VOLÁTEIS | % CARBONO FIXO | % CINZAS |
|------------|-----------|----------------------|----------------|----------|
| Classe I   | 5,35      | 16,77                | 73,27          | 4,61     |
| Classe II  | 7,34      | 21,27                | 67,15          | 4,24     |
| Classe III | 7,35      | 20,03                | 69,21          | 3,41     |
| Classe IV  | 5,54      | 22,81                | 67,92          | 3,73     |
| Classe V   | 6,44      | 22,19                | 70,33          | 1,03     |

Os valores obtidos no trabalho nas características do carvão vegetal estão bem próximos e na faixa de variação dos valores encontrados na literatura para todas as classes, e cada uma dessas características químicas tem grande importância para produção de energia.





**Figura 21** – Curvas de TG do carvão vegetal a 500°C por classe em atmosfera de oxigênio.

A tabela 39 mostra a perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela análise termogravimétrica TG carbonizadas a 500° C.

**Tabela 39** – Perda de massa das características químicas do carvão vegetal pela TG de cada classe.

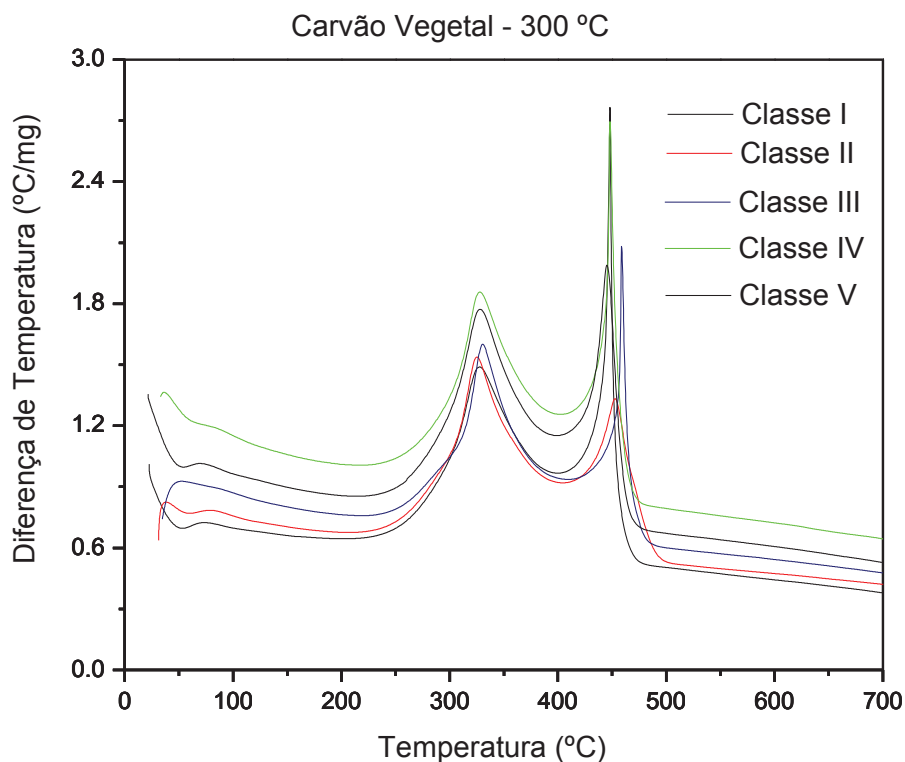
| CLASSES    | % UMIDADE | % MATERIAIS VOLÁTEIS | % CARBONO FIXO | % CINZAS |
|------------|-----------|----------------------|----------------|----------|
| Classe I   | 9,47      | 11,28                | 77,90          | 1,35     |
| Classe II  | 6,16      | 8,90                 | 74,89          | 10,05    |
| Classe III | 5,88      | 10,81                | 74,93          | 8,37     |
| Classe IV  | 7,72      | 18,37                | 72,47          | 1,43     |
| Classe V   | 6,43      | 18,69                | 74,45          | 0,42     |

Os valores obtidos no trabalho nas características do carvão vegetal estão bem próximos e na faixa de variação dos valores encontrados na literatura para todas as classes, e cada uma dessas características químicas tem grande importância para produção de energia.

A DTA é uma técnica na qual a diferença de temperatura entre uma substância e um material de referência é medida em função da temperatura enquanto a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura.

Para Ameloti e Mulina et al., 2010 mostram que o desenvolvimento de modelos térmicos e procedimentos experimentais para controlar qualquer tipo de equipamento são fundamentais para a obtenção de lucro, produtividade e qualidade do carvão vegetal.

Analisando a DTA do carvão vegetal, observou a presença de dois picos exotérmicos em todas as classes I, II, III, IV e V com as amostras carbonizadas nas temperaturas 300°C (Figura 22), 350°C (Figura 23), 400°C (Figura 24), 450°C (Figura 25) e 500°C (Figura 26).



**Figura 22** – Curvas de DTA do carvão vegetal a 300°C por classe, em atmosfera de oxigênio.

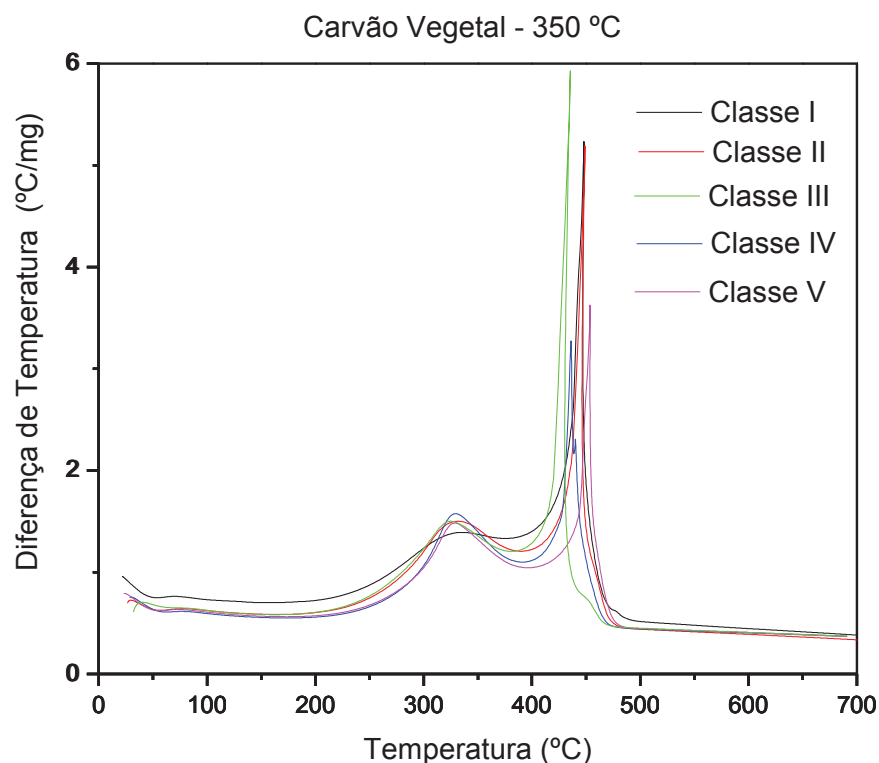
A classe I apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 6,08 MJ/Kg ou 1454,01 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 5,81 MJ/Kg ou 1389,51 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe II apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 6,37 MJ/Kg ou 1523,56 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico 4,54 MJ/Kg ou 1085,84 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe III apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 6,68 MJ/Kg ou 1597,02 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 4,98 MJ/Kg ou 1189,46 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe IV apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 8,82 MJ/Kg ou 2108,01 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 8,18 MJ/Kg ou 1955,16 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe V apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 8,91 MJ/Kg ou 2129,56 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 7,33 MJ/Kg ou 1752,80 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).



**Figura 23** – Curvas de DTA do carvão vegetal a 350°C por classe, em atmosfera de oxigênio.

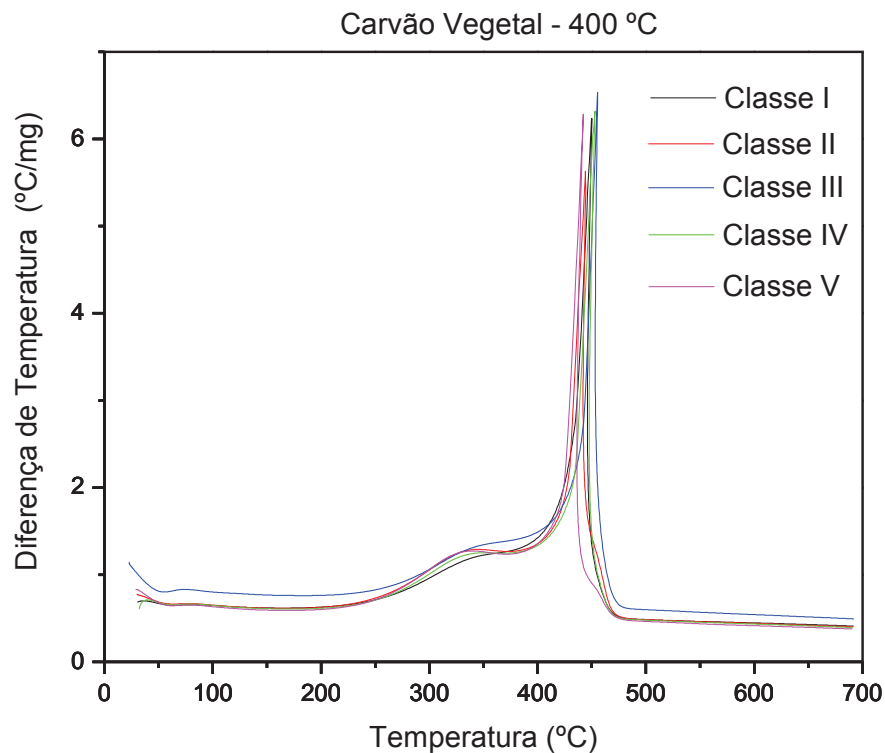
A classe I apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 2,64 MJ/Kg ou 632,89 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 15,64 MJ/Kg ou 3736,67 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe II apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 4,64 MJ/Kg ou 1109,15 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 11,15 MJ/Kg ou 2663,63 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe III apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 4,20 MJ/Kg ou 1004,86 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 10,06 MJ/Kg ou 2402,81 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe IV apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 4,94 MJ/Kg ou 1182,10 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 7,60 MJ/Kg ou 1815,30 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe V apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 4,90 MJ/Kg ou 1170,59 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 8,39 MJ/Kg ou 2004,08 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).



**Figura 24** – Curvas de DTA do carvão vegetal a 400°C por classe, em atmosfera de oxigênio.

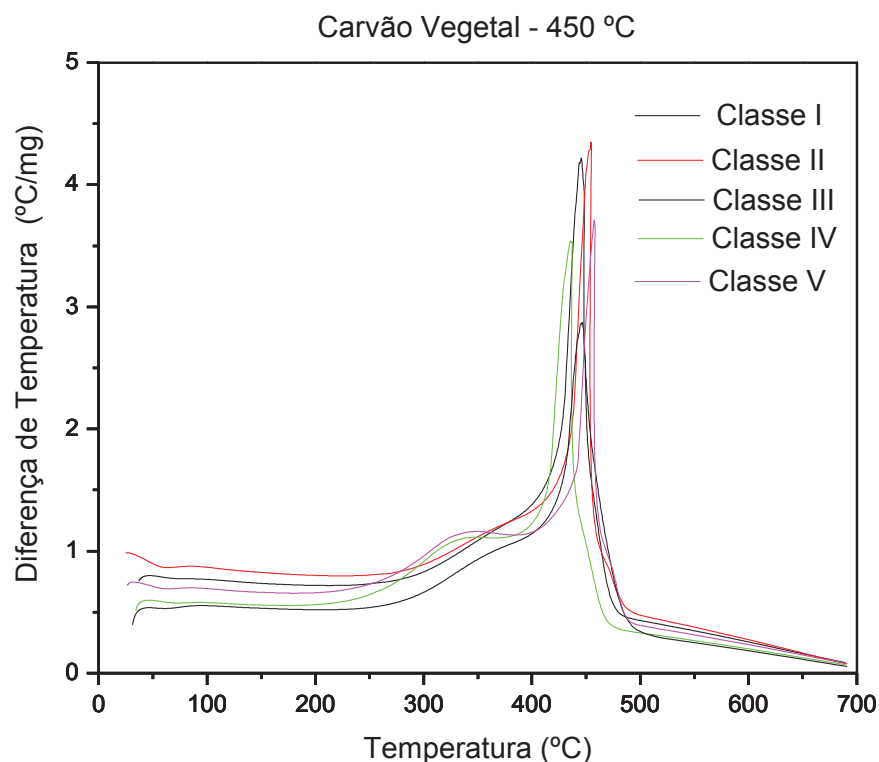
A classe I apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 0,68 MJ/Kg ou 163,95 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 17,63 MJ/Kg ou 4211,87 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe II apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 1,78 MJ/Kg ou 427,52 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 15,45 MJ/Kg ou 3690,47 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe III apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 0,76 MJ/Kg ou 183,59 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 21,99 MJ/Kg ou 5253,89 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe IV apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 1,39 MJ/Kg ou 332,05 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 15,86 MJ/Kg ou 3790,38 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe V apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 1,95 MJ/Kg ou 467,83 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 12,15 MJ/Kg ou 2902,03 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).



**Figura 25** – Curvas de DTA do carvão vegetal a 450°C por classe, em atmosfera de oxigênio.

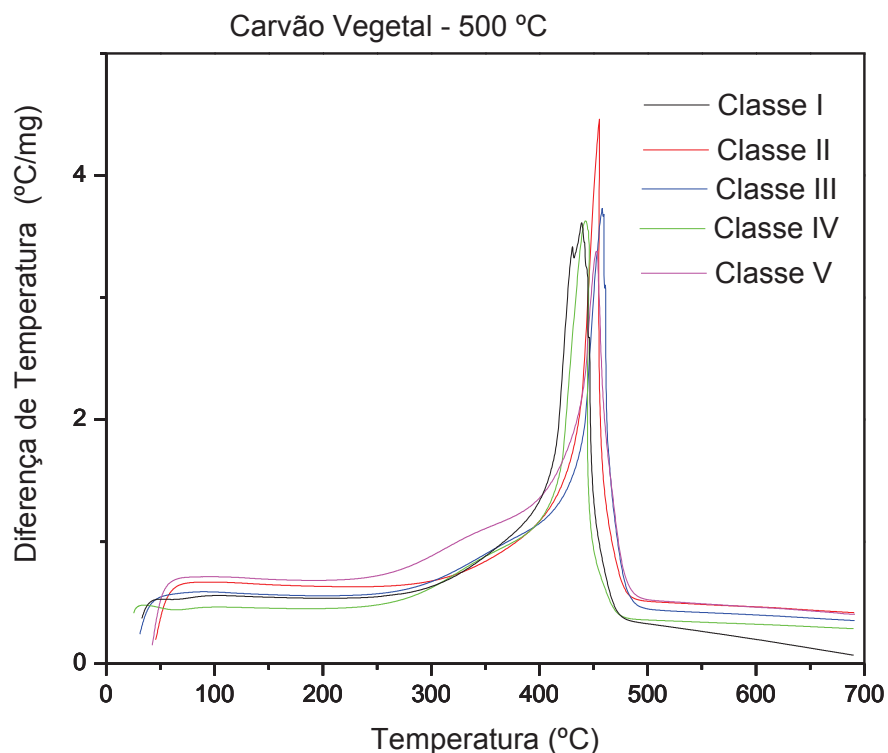
A classe I apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 0,037 MJ/Kg ou 8,95 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 16,04 MJ/Kg ou 3832,99 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe II apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 0,035 MJ/Kg ou 8,45 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 3,96 MJ/Kg ou 3334,81 Kcal/Kg (Queima de Carbono fixo).

A classe III apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 0,053 MJ/Kg ou 12,82 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 8,92 MJ/Kg ou 2131,89 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe IV apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 0,89 MJ/Kg ou 213,53 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 9,45 MJ/Kg ou 2258,75 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe V apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 1,34 MJ/Kg ou 322,23 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 11,21 MJ/Kg ou 2679,25 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).



**Figura 26** – Curvas de DTA do carvão vegetal a 500°C por classe, em atmosfera de oxigênio.

A classe I não apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico apenas no segundo pico exotérmico de 12,30 MJ/Kg ou 2939,87 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe II não apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico apenas no segundo pico exotérmico de 14,19 MJ/Kg ou 3389,51 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe III apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 0,011 MJ/Kg ou 2,81 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 11,94 MJ/Kg ou 2852,27 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

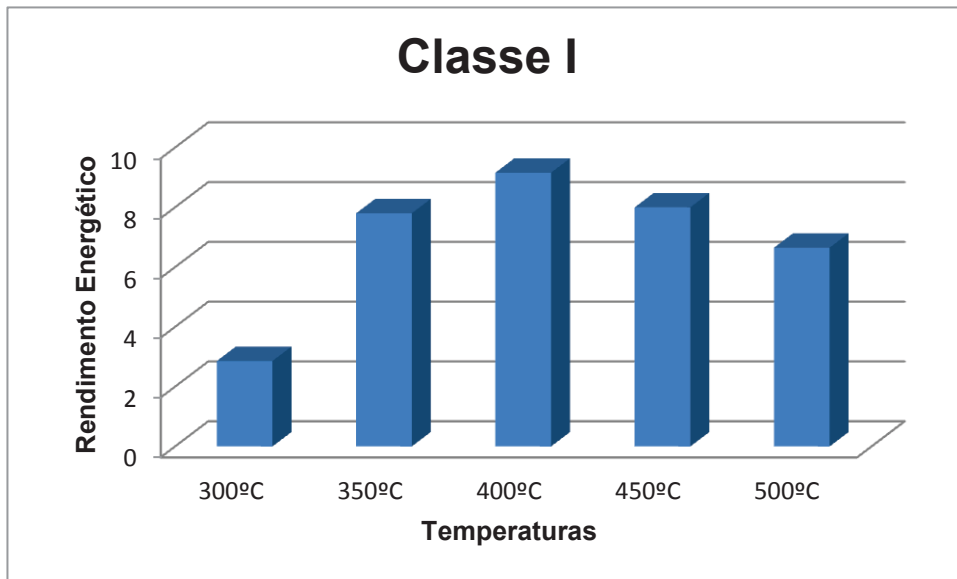
A classe IV apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 0,013 MJ/Kg ou 3,12 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 8,22 MJ/Kg ou 1963,82 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

A classe V apresenta poder calorífico superior referente ao primeiro pico exotérmico de 0,016 MJ/Kg ou 3,91 Kcal/Kg (Queima de Voláteis) e no segundo pico exotérmico de 13,19 MJ/Kg ou 3151,34 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo).

Observa-se para todas as classes uma diminuição da área do primeiro pico exotérmico referente à queima de materiais voláteis e conseqüente aumento da área do segundo pico exotérmico, referente à queima de carbono fixo, com o aumento da temperatura de carbonização.

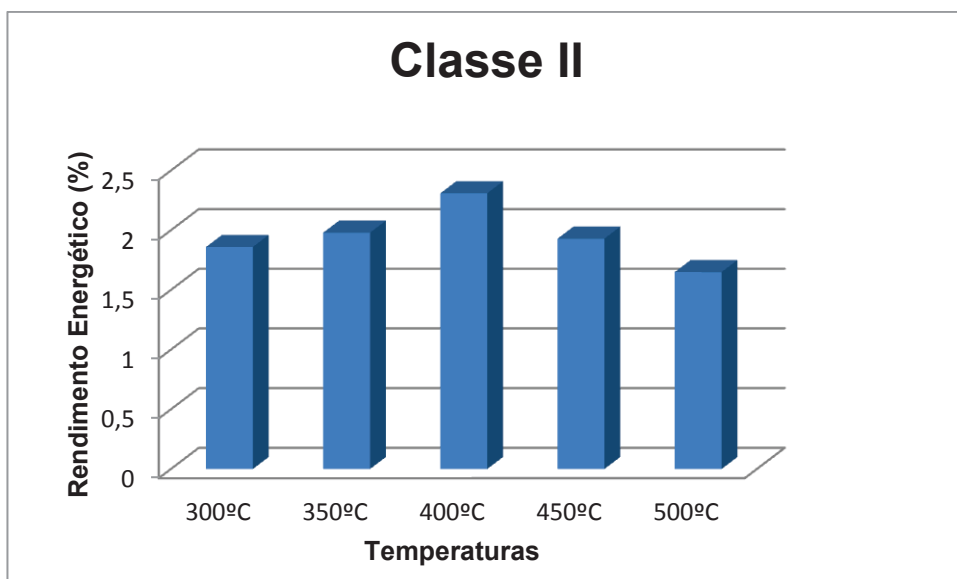
O processo de produção de carvão vegetal, na maioria das empresas, é o processo onde consome parte da madeira como combustível a fim de fornecer a energia necessária para a carbonização do restante da madeira. Processos mais modernos que utilizam de outros combustíveis, muitas vezes provenientes do próprio processo de carbonização (OLIVEIRA, 2009).

Analisando o Rendimento Energético das classes I, II, III, IV e V nas temperaturas 300°C, 350°C, 400°C, 450°C e 500°C podemos observar os seguintes resultados:



**Figura 27** – Gráfico do Rendimento Energético da classe I em relação as temperaturas.

Na classe I o rendimento energético é maior na temperatura 400°C apresenta 9,16%, na temperatura 450°C apresenta o segundo maior valor 8,00%, na temperatura 350°C apresenta o terceiro maior valor 7,80%, na temperatura 500°C apresenta o quarto maior valor 6,65% e na temperatura 300°C apresenta o pior rendimento energético 2,86%.

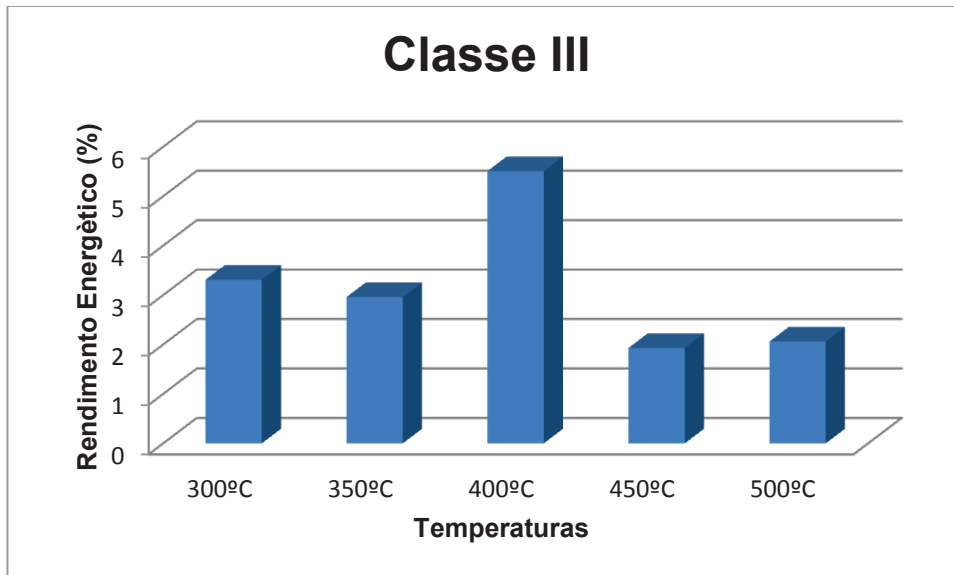


**Figura 28** – Gráfico do Rendimento Energético da classe II em relação as temperaturas.

Na classe II o rendimento energético é maior na temperatura 400°C 2,31%, na temperatura 350°C apresenta o segundo maior valor 1,98%, na temperatura 450°

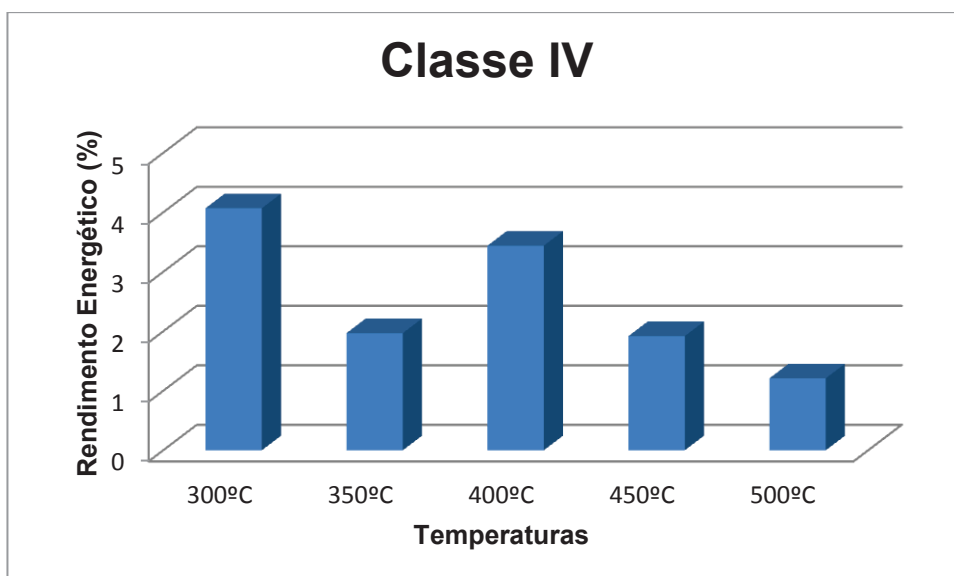


apresenta o terceiro maior valor 1,93%, na temperatura 300°C apresenta o quarto maior valor 1,86% e na temperatura 500°C apresenta o menor rendimento energético 1,65%.



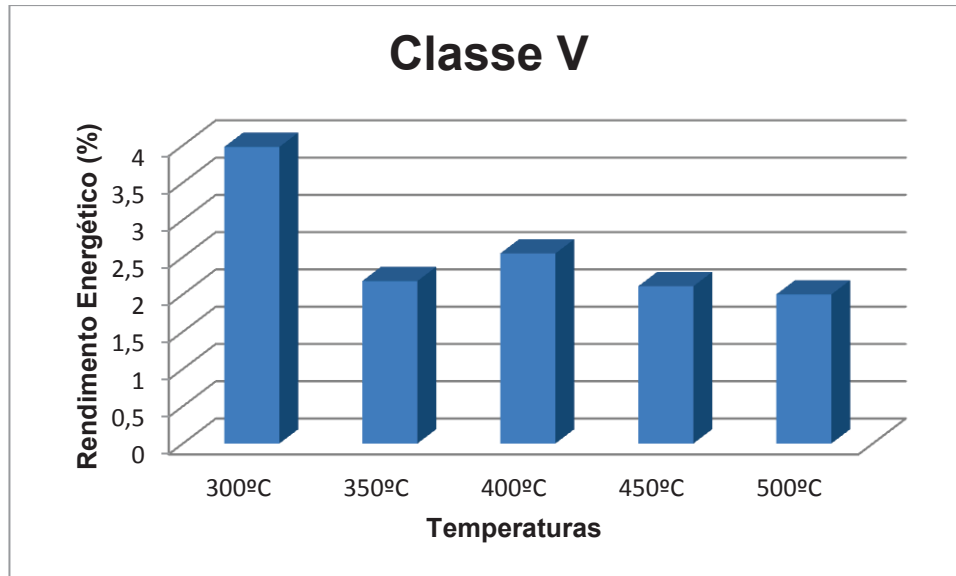
**Figura 29** – Gráfico do Rendimento Energético da classe III em relação as temperaturas.

Na classe III o rendimento energético é maior na temperatura 400°C apresenta 5,51%, na temperatura 300°C apresenta o segundo maior valor 3,31%, na temperatura 350° apresenta o terceiro maior valor 2,96%, na temperatura 500°C apresenta o quarto maior valor 2,06% e na temperatura 450°C apresenta o menor rendimento energético 1,93%.



**Figura 30** – Gráfico do Rendimento Energético da classe IV em relação as temperaturas.

Na classe IV o rendimento energético é maior na temperatura 300°C apresenta 4,07%, na temperatura 400°C apresenta o segundo maior valor 3,44%, na temperatura 350° apresenta o terceiro maior valor 1,97%, na temperatura 450°C apresenta o quarto maior valor 1,92% e na temperatura 500°C apresenta o menor rendimento energético 1,21%.



**Figura 31** – Gráfico do Rendimento Energético da classe V em relação as temperaturas.

Na classe V o rendimento energético é maior na temperatura 300°C apresenta 3,98%, na temperatura 400°C apresenta o segundo maior valor 2,55%, na temperatura 350° apresenta o terceiro maior valor 2,18%, na temperatura 450°C apresenta o quarto maior valor 2,11% e na temperatura 500°C apresenta o menor rendimento energético 2,00%.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no trabalho, podemos concluir que:

- No presente trabalho o tempo de exposição empregado não foi suficiente para permitir a completa transferência de calor para os materiais em estudo, especificamente na temperatura de 300° C onde os materiais utilizados sofreram pequena decomposição, podendo ser caracterizados apenas como madeira torrificada.
- Pode ser produzido carvão vegetal da madeira de Eucalipto da espécie *Eucalyptus dunnii* Maiden nas temperaturas de 350°C, 400°C, 450°C e 500°C para geração de energia.
- O carvão vegetal produzido pela espécie *Eucalyptus dunnii* Maiden apresenta características física e química que podem ser utilizado como matéria prima sendo uma alternativa renovável de energia.
- O carvão vegetal produzido na temperatura de 400° C é o mais indicado para geração de energia, em função do seu maior valor de poder calorífico 21,99 MJ/Kg ou 5253,89 Kcal/Kg (Queima de Carbono Fixo), rendimento carbono fixo 15,57% e energético 9,16 %.

## **7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

- Determinar a porosidade aparente, absorção de água, densidade aparente e densidade aparente do sólido dos corpos de prova (Normas ASTM C 20).
- Realizar a carbonização em maiores faixas de temperaturas.
- Realizar os cálculos das estimativas de produção: produtividade volumétrica, produtividade, incremento médio anual, produção energética e produtividade energética.
- Realizar um estudo de viabilidade econômica do plantio do eucalipto a produção de carvão vegetal.
- Determinar o Poder calorífico pela bomba calorimétrica pela norma DIN51900.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8112/83 – Carvão Vegetal – Análise Imediata**. Rio de Janeiro/RJ.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6923/81 – Carvão Vegetal – Amostragem e preparação das amostras**. Rio de Janeiro/RJ.
- ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário Estatístico da ABRAF 2011 ano base 2010**. Brasília. 130 p. 2011.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Relatório ANEEL 2010**. Brasília: ANEEL, 2011.
- AMELOTI, G. B., CARVALHO, S. R. **Simulação numérica do processo de aquecimento e dinâmica dos gases no interior de um forno industrial**. CREEM, 2010. Viçosa, MG.
- ANDRADE, A. M. de. **Efeitos da Fertilização Mineral e da Calagem na Produção e na Qualidade da Madeira e do Carvão de Eucalipto**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. p.105. 1993.
- ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. **O Processo de Carbonização Contínua da Madeira**. Fundo Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. Compilado por Waldir Resende Penedo. Belo Horizonte. p. 177-180. 1982.
- ALMEIDA, M. R.; RESENDE, M. E. A. O processo de carbonização contínua da madeira. In: PENEDO, W. R. (Ed.) **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 141-156.
- ASSIS, P. S. Utilização de carvão vegetal em siderurgia. In: FUNDAÇÃO CETEC – **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, p.281-31, 1982.
- BERTOLA, A. **Eucalipto Verdades Mentiras**. Setor de Inventário Florestal. Cuvelo: Minas Gerais, 2006.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço energético nacional**. Brasília, DF, p. 169, 2004.
- BARRICHELO, L. E. G. **O eucalipto no contexto florestal brasileiro**. Revista Ecologia e Desenvolvimento, v. 5, n. 54, p. 23, 1995.

BAGGIO, A. J., CARPANEZZI, A. A. **Quantificação dos resíduos florestais em bracatingais na região metropolitana de Curitiba, PR.** *Boletim de Pesquisa Florestal* p. 51-66, 1995.

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

BRITO, J. O. **Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais.** Estudos avançados, p. 221-227, 1990a.

BRITO, J. O. **Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira.** Documentos Florestais, Piracicaba p. 19, maio, 1990b.

BEENACKERS, A. C. M.; BRIDGWATER, A. V. **Gaseificação e pirólise de biomassa na Europa em pirólise e gaseificação.** Revista aplicado na Ciência. Londres. v. I. p. 129-155, 1989.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: Densidade da madeira x densidade do carvão.** IPEF, Piracicaba (20): 101-113, 1980.

BRASIL, M. A. A.; VEIGA, R. A.; FERREIRA, M. **Variação da densidade básica nas seções transversais do caule da base do tronco para a copa de eucalipto.** IPEF, (15):73 – 82, 1977.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR.** 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

CARVALHO, R. M. M. A.; SOARES, T. S.; VALVERDE, S. R. **Setor Florestal é destaque na economia brasileira.** Revista da Madeira, São Paulo, v. 16, n. 95, p. 14 – 24, abril 2006.

CARVÃO VEGETAL: o eucalipto na indústria de carvão vegetal. **Revista da Madeira**, v.13, n.75, 2003.

COUTO, L.; FONSECA, E. M. B.; MÜLLER, M. D. **O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais:** aspectos técnicos, econômicos sociais e ambientais. Belo Horizonte: CEMIG, 2000. 44p.

CORTEZ, L. A.; LORA, E. S. **Tecnologias de Conversão da Biomassa.** Séries Sistemas Energéticos II, EDUA/EFEI, Manaus. 1997.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do Carvão Vegetal para Siderurgia.** Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 1996.

CUNHA, M. P. S. C. et al. **Estudo Químico de 55 Espécies Lenhosas para Geração de Energia em Caldeiras**. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, São Carlos, v.2, p. 93-121, 1989.

CARMO, J. S. **Propriedades físicas e químicas do carvão vegetal destinado à siderurgia e metalurgia**. 1988. Monografia (Graduação em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

DERMIRBAS, A. **Conversão de Energia**. v 42. p. 1357-1378. 2001.

DELLA LUCIA, R. M. **Correção das Leituras do Medidor Elétrico de Umidade para 22 Espécies de Madeira**. Revista Árvore, Viçosa. p. 202-208, 1992.

DOAT, J.; PETROF, G. **A carbonização das Madeiras Tropicais: Matas e Florestas**. p. 55-64, 1975.

FILHO, E. P.; SANTOS, P. E. T. de. **Considerações Sobre o Plantio de *Eucalyptus dunnii* no Estado do Paraná**. Colombo, PR dezembro, 2005.

FERREIRA, O. C. **Emissão de gases de efeito estufa na produção e no uso do carvão vegetal na siderurgia**. Economia e Energia, Belo Horizonte, v. 3, n. 21, 2000.

FREITAS, S.; FILHO, E. B. **Efeito da Desfolha Parcial e Total na Produção de Biomassa de *Eucalyptus grandis***. Mogi Guaçu, São Paulo. IPEF, Piracicaba, n. 47, p. 29-35, 1994.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P. Y. **Melhoramento Genético da Densidade Básica da Madeira de Eucalipto**. Silvicultura, v. 2, n. 14, p. 148-152, 1978.

FOELKEL, C. E. B. **Madeira de Eucalipto: da floresta ao digestor**. IPEF-Boletim Informativo, Piracicaba, 6(20): E-1-25, 1978.

GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Ed. Edusp. São Paulo. p. 234, 1998.

GALVÃO, A. P. M., JANKOWSKY, I. P. **Secagem Racional de Madeira**. São Paulo: Nobel, p. 112, 1985.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. **Teoria da Carbonização da Madeira**. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte, p. 27-41, 1980.

HÜEBLIN. H. J. **Modelo para a Aplicação da Metodologia Zeri**. Sistema de aproveitamento integral da biomassa de árvores de reflorestamento. Curitiba, p. 139, 2001.

- HIGA, R. C. V. **Avaliação e Recuperação de *Eucalyptus dunnii* atingidos por geadas**. 1998. 100 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. Brasil. v. 5. 50 p. 2010.
- JOVANOVIC, T.; BOOTH, T. H. **Espécies melhoradas com perfis climáticas**. Belo Horizonte: Agroflorestal. Programa Rural e Indústrias de Pesquisa e Desenvolvimento Corporacional, 2002. 68 p.
- JARA, E. R. P. **O Poder Calorífico de Algumas Madeiras que Ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.
- LIMA, W. P. **O reflorestamento com Eucalipto e seus impactos ambientais**. São Paulo, p. 114, 2005.
- LIN, J. C. M. **Desenvolvimento de um elevado rendimento e baixo tempo de ciclo de biomassa sistema de produção**. Tecnologia de Processamento de combustível. Amsterdam, v. 87, n. 6, p. 487 – 495, Julho, 2006.
- MULINA, B. H. O. et al. **Development of a supervisory system to measure the temperature inside chacoal kilns**. COBEM, 2009. Gramado, RS.
- MCKENDRY, P. **Recurso tecnológico**. v. 82. p. 47-54. 2002.
- MARTIN, F. M. **Carvão Vegetal**. Madrid. p. 116, 1989.
- MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e Controle da Qualidade do Carvão Vegetal**. Belo Horizonte, p. 77 – 89, 1982.
- NIST Recommended Practice Guide. **DTA and Heat-flux DSC Measurements of Alloy Melting and Freezing**. Special Publication 960-15. p. 90. November 2006.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2<sup>a</sup> ed., p. 199, 2003.
- OLIVEIRA, R. L. M., **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal**. 2009. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG.
- OLIVEIRA, J. T. S; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias Aplicadas ao Setor Madeireiro**. Jerônimo Monteiro: Supremo, 2008.
- OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R., PIMENTA, A. S.; LUCIA, R. D. L.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A. C. O. **Estrutura Anatômica da Madeira e Qualidade do Carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.)**. Revista Árvore, v.30, n.2, p.311-318, 2006.
- OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. R. **Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira *Eucalyptus saligna* Smith**. Revista Árvore, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381- 385, 2003.



OLIVEIRA, E.; VITAL, R. B.; VALENTE, F.; GOMIDE, L. J. **Efeito da qualidade da madeira sobre o rendimento e qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis*.** *Revista Árvore*, 13(1): 85-97, 1989.

OLIVEIRA, E. **Correlação Entre Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão de *Eucalyptus grandis*.** Viçosa Minas Gerais, UFV, 47 p. Tese Mestrado. 1988.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. **Propriedades do Carvão Vegetal.** In: PENEDO, W. R. (ed) *Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, controle de qualidade.* Belo Horizonte, CETEC. p. 39-61, 1982b.

OLIVEIRA, J. B.; FILHO, A. V.; GOMES, P. A. **Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos.** Belo Horizonte, CETEC, p. 60-73, 1982a.

PINHEIRO, P. C.; SAMPAIO, R. S.; REZENDE, M. A. **A Produção de Carvão Vegetal: teoria e prática.** 2ª ed. Belo Horizonte. 120 p. 2008.

PALUDZYSYN FILHO, E. **Melhoramento do eucalipto para a produção de energia.** *Revista Opiniões*, Ribeirão Preto, jun-ago 2008.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. dos; FERREIRA, C. A. **Eucaliptos indicados para plantio no Estado do Paraná.** Colombo: Embrapa Florestas - CNPF, 2006. 45 p. (Documentos, 129).

PINHEIRO, P. C.; SAMPAIO, R. S.; REZENDE, M. A.; VIANA, E. **A Produção de Carvão Vegetal.** Belo Horizonte: UFMG. 103 p. 2006.

PIMENTA, A. S. **Curso de atualização em carvão vegetal.** Apostila, documento interno. – Viçosa: UFV/DEF, 2002.

PINHEIRO, P. C.; SAMPAIO, R. S.; REZENDE, M. A.; BASTOS FILHO, J. G. **Fundamentos e Prática da Carbonização de Biomassa.** Belo Horizonte, p. 120, 2001.

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da Madeira de Algumas Espécies de Eucalipto Plantadas no Brasil.** Embrapa Florestas. Documentos 38. Colombo, PR Brasil, 2000.

PANSHIN, A. J.; ZEEW, C. **Livro de Tecnologia da Madeira.** 4ª ed. São Paulo, p. 722, 1980.

QUADROS, L. Q. **Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas.** MINISTÉRIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA. São Paulo, 2005.

ROHDE, G.M. **O Mito da combustão espontânea do carvão.** *Revista da Madeira*, Julho, 2007.

RAMOS, L. P. **Aproveitamento Integral de Resíduos Agrícolas e Agroindustriais**. Centro de Pesquisa em Química Aplicada. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil 2001.

SILVA, M. G. da; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. **Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas**. Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA. v. 37(1), p. 61 – 70, 2007.

SYRED, C. **Um sistema eficiente para a produção de calor de carvão vegetal**. v. 85, p.1566-1578, 2006.

SILVA, D. A. **Alternativas de Uso de Resíduos Florestais para Geração de Energia**. In. Semana de Estudos Florestais. Irati. **Anais**. UNICENTRO, p. 199-224, 2005.

SANTOS, I. S. **Fungos Micorrízicos Arbusculares em Ambiente de Mata Atlântica e de Eucaliptos na Região de Entre Rios**. Bahia. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

SAMPAIO, R. S. **Integrando biomassa cultivada com carvão e de aço para a fixação de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> regeneração**. In: CONFERÊNCIA DE BIOMASSA DAS AMÉRICAS, 1999.

SOARES, R. V., 1995. **Queimas controladas: prós e contras**. In: *Fórum Nacional Sobre Incêndios Florestais*, IPEF/FUPEF/SIF, p. 6-10, 1995.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELLO, L. E. G. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.* In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 24., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo, ABTCP, 1991. p.178-183.

SPELTZ, R. M., MONTEIRO, R. F. R. ***E. dunnii* Perspectivas de sua Introdução no Segundo Planalto Paranaense**. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CELULOSE E PAPEL – SEMANA, 1982.

SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Ligninas: ocorrência, formação da estrutura e da Reação**. p. 916, 1971.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. **Avaliação de Clones de *Eucalyptus* para Produção de Carvão Vegetal**. Cerne, v.7, n.2, p.104-114, 2001.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agrária**, Curitiba, v.2, n.1-2, p.45-53, 2001.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. **Influência da Temperatura Final de Carbonização nas Características Físicas e Químicas do Carvão Vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril* L.)** 29 nov. 1999.

TRUGILHO, P. F. **Produtos Energéticos e Preservação da Madeira.** Lavras: UFLA. p. 59. 1999.

TRIPATHI, A. K., IYER, P. V. R., KANDPAL, T. C. **A avaliação técnico-econômica da briquetagem de biomassa.** *Biomassa e Bioenergia.* v. 14, n 5/6. p. 479-488, 1998.

TRUGILHO, P. F. **Aplicação de Algumas Técnicas Multivariadas na Avaliação da Qualidade da Madeira e do Carvão de *Eucalyptus*.** 1995. 160 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

VALE, A. T.; MOURA, V. P. G.; MARTINS, I. S.; PEREIRA, F. S. **Influência da gamose e da procedência de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maidem no rendimento da carbonização e na qualidade do carvão vegetal.** *Revista Árvore,* 21(2): 253-258, 1997.

WENZL, H. F. J. **A Tecnologia Química da Madeira.** p. 692, 1970.

**ANEXOS**

**Tabela 33 – Teste de Bartlett - Densidade da Madeira.**

| TRATAMENTOS | MÉDIA   | VARIÂNCIA |
|-------------|---------|-----------|
| 1           | 0.62500 | 0.00037   |
| 2           | 0.61250 | 0.00029   |
| 3           | 0.62250 | 0.00023   |
| 4           | 0.59250 | 0.00016   |
| 5           | 0.63000 | 0.00087   |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 34 – Análise ANOVA – DIC – Densidade da Madeira.**

| F. V.       | G. L. | S. Q.    | Q. M.   | F         |
|-------------|-------|----------|---------|-----------|
| Tratamentos | 4     | 0.000353 | 0.00088 | 2.3122 ns |
| Resíduo     | 15    | 0.00572  | 0.00038 |           |
| Total       | 19    | 0.00925  |         |           |

**\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )**

**\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )**

**ns não significativo ( $p \geq .05$ )**

**Tabela 35 – Teste de Bartlett – Umidade Serragem da Madeira**

| TRATAMENTOS | MÉDIA    | VARIÂNCIA |
|-------------|----------|-----------|
| 1           | 9.75279  | 0.02151   |
| 2           | 9.62095  | 0.05698   |
| 3           | 10.19971 | 0.17181   |
| 4           | 10.40077 | 0.22185   |
| 5           | 10.00499 | 0.11597   |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 36 - Análise ANOVA – DIC – Umidade Serragem da Madeira.**

| F. V.       | G. L. | S. Q.   | Q. M.   | F        |
|-------------|-------|---------|---------|----------|
| Tratamentos | 4     | 1.62091 | 0.40523 | 3.4451 * |
| Resíduo     | 15    | 1.76436 | 0.11762 |          |
| Total       | 19    | 3.38527 |         |          |

**\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )**

**\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )**

**ns não significativo ( $p \geq .05$ )**

**Tabela 37 – Teste de Bartlett – Materiais Voláteis Serragem da Madeira**

| TRATAMENTOS | MÉDIA    | VARIÂNCIA |
|-------------|----------|-----------|
| 1           | 86.27590 | 0.09633   |
| 2           | 86.82608 | 0.13106   |
| 3           | 86.27344 | 0.26407   |
| 4           | 85.83271 | 0.11890   |
| 5           | 86.81919 | 0.02658   |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 38 - Análise ANOVA – DIC – Materiais Voláteis Serragem da Madeira.**

| F. V.       | G. L. | S. Q.   | Q. M.   | F         |
|-------------|-------|---------|---------|-----------|
| Tratamentos | 4     | 2.84143 | 0.71036 | 5.5762 ** |
| Resíduo     | 15    | 1.91085 | 0.12739 |           |
| Total       | 19    | 4.75229 |         |           |

**\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )**

**\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )**

**ns não significativo ( $p \geq .05$ )**

**Tabela 39 – Teste de Bartlett – Cinzas Serragem da Madeira**

| TRATAMENTOS | MÉDIA   | VARIÂNCIA |
|-------------|---------|-----------|
| 1           | 0.38542 | 0.00062   |
| 2           | 0.37736 | 0.00156   |
| 3           | 0.36872 | 0.00151   |
| 4           | 0.38228 | 0.00086   |
| 5           | 0.37608 | 0.00221   |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 40 - Análise ANOVA – DIC – Cinzas Serragem da Madeira.**

| F. V.       | G. L. | S. Q.   | Q. M.   | F         |
|-------------|-------|---------|---------|-----------|
| Tratamentos | 4     | 0.00065 | 0.00016 | 0.1212 ns |
| Resíduo     | 15    | 0.02025 | 0.00135 |           |
| Total       | 19    | 0.02090 |         |           |

**\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )**

**\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )**

**ns não significativo ( $p \geq .05$ )**

**Tabela 41 – Teste de Bartlett – Carbono Fixo Serragem da Madeira**

| TRATAMENTOS | MÉDIA   | VARIÂNCIA |
|-------------|---------|-----------|
| 1           | 3.58500 | 0.15723   |
| 2           | 3.17250 | 0.18083   |
| 3           | 3.15750 | 0.38289   |
| 4           | 3.38500 | 0.21070   |
| 5           | 2.80250 | 0.09349   |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 42 - Análise ANOVA – DIC – Carbono Fixo Serragem da Madeira.**

| F. V.       | G. L. | S. Q.   | Q. M.   | F         |
|-------------|-------|---------|---------|-----------|
| Tratamentos | 4     | 1.36367 | 0.34092 | 1.6628 ns |
| Resíduo     | 15    | 3.07543 | 0.20503 |           |
| Total       | 19    | 4.43910 |         |           |

**\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )**

**\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )**

**ns não significativo ( $p \geq .05$ )**

**Tabela 43 – Teste de Bartlett – Densidade Carvão.**

| TRATAMENTO | MÉDIA   | VARIÂNCIA |
|------------|---------|-----------|
| 1          | 0.59875 | 0.00054   |
| 2          | 0.31087 | 0.00021   |
| 3          | 0.28619 | 0.00034   |
| 4          | 0.25986 | 0.00035   |
| 5          | 0.25806 | 0.00006   |
| 6          | 0.58588 | 0.00024   |
| 7          | 0.30670 | 0.00020   |
| 8          | 0.27640 | 0.00033   |
| 9          | 0.27457 | 0.00014   |
| 10         | 0.25112 | 0.00009   |
| 11         | 0.61519 | 0.00021   |
| 12         | 0.30939 | 0.00017   |
| 13         | 0.28063 | 0.00031   |
| 14         | 0.27597 | 0.00012   |
| 15         | 0.25694 | 0.00005   |

|    |         |         |
|----|---------|---------|
| 16 | 0.51083 | 0.00076 |
| 17 | 0.30336 | 0.00026 |
| 18 | 0.28517 | 0.00025 |
| 19 | 0.26499 | 0.00035 |
| 20 | 0.25640 | 0.00012 |
| 21 | 0.56720 | 0.00024 |
| 22 | 0.30940 | 0.00028 |
| 23 | 0.28150 | 0.00049 |
| 24 | 0.27551 | 0.00013 |
| 25 | 0.25652 | 0.00010 |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 44 - Análise ANOVA – Experimento Fatorial – Densidade Carvão.**

| F. V.       | G. L. | S. Q.   | Q. M.   | F            |
|-------------|-------|---------|---------|--------------|
| Fator1(F1)  | 4     | 0.00615 | 0.00154 | 6.0720 **    |
| Fator2(F2)  | 4     | 1.43671 | 0.35918 | 1418.7415 ** |
| Int. F1xF2  | 16    | 0.02111 | 0.00132 | 5.2124 **    |
| Tratamentos | 24    | 1.46397 | 0.06100 | 240.9439 **  |
| Resíduo     | 75    | 0.01899 | 0.00025 |              |
| Total       | 99    | 1.48296 |         |              |

**\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )**

**\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )**

**ns não significativo ( $p \geq .05$ )**

**Tabela 45 - Teste de Bartlett – Umidade Carvão.**

| TRATAMENTO | MÉDIA   | VARIÂNCIA |
|------------|---------|-----------|
| 1          | 3.88831 | 0.01295   |
| 2          | 3.79365 | 0.00072   |
| 3          | 3.72524 | 0.01042   |
| 4          | 3.67879 | 0.01144   |
| 5          | 3.88870 | 0.01068   |
| 6          | 5.41035 | 0.00236   |
| 7          | 5.30233 | 0.00046   |
| 8          | 5.34049 | 0.00447   |
| 9          | 5.20809 | 0.00159   |
| 10         | 5.21405 | 0.00803   |
| 11         | 6.00225 | 0.00985   |



|    |         |         |
|----|---------|---------|
| 12 | 6.18740 | 0.06592 |
| 13 | 6.41366 | 0.11809 |
| 14 | 6.48930 | 0.10482 |
| 15 | 6.24543 | 0.00989 |
| 16 | 6.40768 | 0.13862 |
| 17 | 6.24959 | 0.01897 |
| 18 | 6.41174 | 0.00488 |
| 19 | 6.36359 | 0.14730 |
| 20 | 6.27858 | 0.11706 |
| 21 | 6.25161 | 0.00740 |
| 22 | 6.40660 | 0.00334 |
| 23 | 6.33829 | 0.00870 |
| 24 | 6.28869 | 0.00401 |
| 25 | 6.25809 | 0.00430 |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 46 – Análise ANOVA – Experimento Fatorial - Umidade Carvão.**

| F. V.       | G. L. | S. Q.    | Q. M.    | F           |
|-------------|-------|----------|----------|-------------|
| Fator1(F1)  | 4     | 97.00059 | 24.25015 | 733.7373 ** |
| Fator2(F2)  | 4     | 0.05726  | 0.01431  | 0.4331 ns   |
| Int. F1xF2  | 16    | 0.95113  | 0.05945  | 1.7987 *    |
| Tratamentos | 24    | 98.00898 | 4.08371  | 123.5608 ** |
| Resíduo     | 75    | 2.47876  | 0.03305  |             |
| Total       | 99    |          |          |             |

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**Tabela 47 - Teste de Bartlett – Materiais Voláteis Carvão.**

| TRATAMENTO | MÉDIA    | VARIÂNCIA |
|------------|----------|-----------|
| 1          | 78.44832 | 0.19251   |
| 2          | 45.30412 | 0.19251   |
| 3          | 42.60047 | 0.54914   |
| 4          | 33.41467 | 0.62099   |
| 5          | 32.08809 | 0.57970   |
| 6          | 79.45433 | 0.65453   |

|    |          |         |
|----|----------|---------|
| 7  | 51.79735 | 0.44090 |
| 8  | 41.19578 | 1.00502 |
| 9  | 37.86871 | 0.79520 |
| 10 | 34.75387 | 0.68208 |
| 11 | 84.87959 | 0.42735 |
| 12 | 49.54398 | 4.60920 |
| 13 | 38.97153 | 0.19523 |
| 14 | 35.70286 | 0.30647 |
| 15 | 32.26225 | 0.92525 |
| 16 | 78.37979 | 0.17730 |
| 17 | 63.97069 | 1.57143 |
| 18 | 38.14374 | 0.45821 |
| 19 | 38.47718 | 1.19064 |
| 20 | 36.98544 | 0.28197 |
| 21 | 79.62133 | 0.83400 |
| 22 | 61.70164 | 1.82453 |
| 23 | 40.30705 | 0.83984 |
| 24 | 39.44035 | 0.18251 |
| 25 | 35.63400 | 0.83611 |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 48 – Análise ANOVA – Experimento Fatorial – Materiais Voláteis Carvão.**

| F. V.       | G. L. | S. Q.       | Q. M.      | F            |
|-------------|-------|-------------|------------|--------------|
| Fator1(F1)  | 4     | 348.79791   | 87.19948   | 93.0213 **   |
| Fator2(F2)  | 4     | 28724.35027 | 7181.08757 | 7660.5272 ** |
| Int. F1xF2  | 16    | 1016.38544  | 63.52409   | 67.7652 **   |
| Tratamentos | 24    | 30089.53362 | 1253.73057 | 1337.4349 ** |
| Resíduo     | 75    | 70.30607    | 0.93741    |              |
| Total       | 99    | 30159.83969 |            |              |

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**Tabela 49 - Teste de Bartlett – Cinzas Carvão.**

| TRATAMENTO | MÉDIA   | VARIÂNCIA |
|------------|---------|-----------|
| 1          | 0.80284 | 0.00020   |

|    |         |         |
|----|---------|---------|
| 2  | 2.03479 | 0.00082 |
| 3  | 1.46620 | 0.00063 |
| 4  | 2.34961 | 0.05615 |
| 5  | 2.63266 | 0.14839 |
| 6  | 0.80242 | 0.00015 |
| 7  | 1.82929 | 0.00052 |
| 8  | 2.27150 | 0.04541 |
| 9  | 2.76501 | 0.10926 |
| 10 | 2.93307 | 0.00201 |
| 11 | 0.81813 | 0.00036 |
| 12 | 1.98993 | 0.00887 |
| 13 | 1.67505 | 0.00856 |
| 14 | 2.35969 | 0.01354 |
| 15 | 2.93307 | 0.00201 |
| 16 | 0.81611 | 0.00036 |
| 17 | 1.43317 | 0.02056 |
| 18 | 2.25766 | 0.00848 |
| 19 | 2.85576 | 0.01082 |
| 20 | 2.59124 | 0.01680 |
| 21 | 0.80963 | 0.00014 |
| 22 | 1.20241 | 0.00194 |
| 23 | 2.23039 | 0.01484 |
| 24 | 2.35167 | 0.00298 |
| 25 | 2.79556 | 0.01776 |

H0: As variâncias são homogêneas.

Tabela 50 – Análise ANOVA – Experimento Fatorial – Cinzas Carvão.

| F. V.       | G. L. | S. Q.    | Q. M.    | F           |
|-------------|-------|----------|----------|-------------|
| Fator1(F1)  | 4     | 0.87904  | 0.21976  | 11.1769 **  |
| Fator2(F2)  | 4     | 47.83719 | 11.95930 | 608.2437 ** |
| Int. F1xF2  | 16    | 5.01094  | 0.31318  | 15.9284 **  |
| Tratamentos | 24    | 53.72717 | 2.23863  | 113.8557 ** |
| Resíduo     | 75    | 1.47465  | 0.01966  |             |
| Total       | 99    | 55.20182 |          |             |

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**Tabela 51 – Teste de Bartlett – Carbono Fixo Carvão.**

| <b>TRATAMENTO</b> | <b>MÉDIA</b> | <b>VARIÂNCIA</b> |
|-------------------|--------------|------------------|
| 1                 | 16.86053     | 0.24728          |
| 2                 | 47.25075     | 3.29487          |
| 3                 | 49.93110     | 0.49375          |
| 4                 | 57.82804     | 0.60251          |
| 5                 | 59.02763     | 0.81133          |
| 6                 | 15.94961     | 0.66338          |
| 7                 | 41.07103     | 0.45307          |
| 8                 | 50.34533     | 0.46674          |
| 9                 | 53.11668     | 0.38166          |
| 10                | 56.07740     | 0.70709          |
| 11                | 10.57704     | 0.47199          |
| 12                | 43.12561     | 4.11332          |
| 13                | 52.93977     | 0.45452          |
| 14                | 55.52570     | 0.39654          |
| 15                | 58.46639     | 1.03742          |
| 16                | 17.12531     | 0.15024          |
| 17                | 29.38805     | 1.39738          |
| 18                | 53.10931     | 0.76707          |
| 19                | 52.30347     | 0.95804          |
| 20                | 54.13464     | 0.25625          |
| 21                | 15.68034     | 0.82050          |
| 22                | 31.88190     | 2.03166          |
| 23                | 51.21714     | 0.85151          |
| 24                | 51.92939     | 0.02323          |
| 25                | 55.31235     | 0.96605          |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 52 - Análise ANOVA – Experimento Fatorial – Cinzas Carvão.**

| <b>F. V.</b>      | <b>G. L.</b> | <b>S. Q.</b> | <b>Q. M.</b> | <b>F</b>     |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Fator1(F1)</b> | 4            | 353.68338    | 88.42085     | 96.8788 **   |
| <b>Fator2(F2)</b> | 4            | 23438.26364  | 5859.56591   | 6420.0660 ** |
| <b>Int. F1xF2</b> | 16           | 889.40548    | 55.58784     | 60.9051 **   |

|                    |    |             |            |              |
|--------------------|----|-------------|------------|--------------|
| <b>Tratamentos</b> | 24 | 24681.35249 | 1028.38969 | 1126.7609 ** |
| <b>Resíduo</b>     | 75 | 68.45217    | 0.91270    |              |
| <b>Total</b>       | 99 | 24749.80466 |            |              |

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**Tabela 53 - Teste de Bartlett – Rendimento Gravimétrico.**

| <b>TRATAMENTO</b> | <b>MÉDIA</b> | <b>VARIÂNCIA</b> |
|-------------------|--------------|------------------|
| 1                 | 72.04372     | 2.45043          |
| 2                 | 35.43274     | 2.87621          |
| 3                 | 29.00597     | 2.63967          |
| 4                 | 25.81599     | 8.56632          |
| 5                 | 21.35501     | 1.89199          |
| 6                 | 72.48953     | 7.21532          |
| 7                 | 34.78692     | 3.15925          |
| 8                 | 29.28173     | 3.97134          |
| 9                 | 25.86472     | 0.71739          |
| 10                | 20.99813     | 2.58319          |
| 11                | 75.21724     | 3.82403          |
| 12                | 33.82273     | 1.06928          |
| 13                | 29.73417     | 1.80114          |
| 14                | 26.68320     | 2.31062          |
| 15                | 22.10522     | 0.96590          |
| 16                | 72.34257     | 2.64685          |
| 17                | 36.92968     | 1.73569          |
| 18                | 32.34233     | 9.55618          |
| 19                | 26.38976     | 7.01524          |
| 20                | 22.29198     | 3.72139          |
| 21                | 73.98368     | 1.22150          |
| 22                | 36.84337     | 1.10527          |
| 23                | 30.70795     | 7.80475          |
| 24                | 26.53331     | 0.60971          |
| 25                | 21.61692     | 0.75226          |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 54** - Análise ANOVA – Experimento Fatorial – Rendimento Gravimétrico.

| <b>F. V.</b>       | <b>G. L.</b> | <b>S. Q.</b> | <b>Q. M.</b> | <b>F</b>     |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Fator1(F1)</b>  | 4            | 33.89763     | 8.47441      | 2.5770 *     |
| <b>Fator2(F2)</b>  | 4            | 34184.53023  | 8546.13256   | 2598.8443 ** |
| <b>Int. F1xF2</b>  | 16           | 60.10334     | 3.75646      | 1.1423 ns    |
| <b>Tratamentos</b> | 24           | 34278.53121  | 1428.27213   | 434.3318 **  |
| <b>Resíduo</b>     | 75           | 246.63268    | 3.28844      |              |
| <b>Total</b>       | 99           | 34525.16389  |              |              |

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**Tabela 55** - Teste de Bartlett – Rendimento Carbono Fixo.

| <b>TRATAMENTO</b> | <b>MÉDIA</b> | <b>VARIÂNCIA</b> |
|-------------------|--------------|------------------|
| 1                 | 12.14562     | 0.15200          |
| 2                 | 16.74578     | 1.20408          |
| 3                 | 14.48038     | 0.61083          |
| 4                 | 14.93247     | 3.06979          |
| 5                 | 12.60816     | 0.78836          |
| 6                 | 11.55977     | 0.46467          |
| 7                 | 14.27880     | 0.26966          |
| 8                 | 14.73385     | 0.72855          |
| 9                 | 13.73904     | 0.25237          |
| 10                | 11.77945     | 0.97977          |
| 11                | 7.95524      | 0.29293          |
| 12                | 14.59946     | 1.18422          |
| 13                | 15.74193     | 0.58080          |
| 14                | 14.82124     | 0.95813          |
| 15                | 12.92947     | 0.55915          |
| 16                | 12.38804     | 0.12759          |
| 17                | 10.84695     | 0.17006          |
| 18                | 17.18322     | 3.06068          |
| 19                | 13.81276     | 2.33442          |
| 20                | 12.07387     | 1.31767          |
| 21                | 11.59414     | 0.26889          |
| 22                | 11.74640     | 0.38234          |

|    |          |         |
|----|----------|---------|
| 23 | 15.72106 | 1.84674 |
| 24 | 13.77795 | 0.14238 |
| 25 | 11.95436 | 0.20037 |

**H0: As variâncias são homogêneas.**

**Tabela 56 - Análise ANOVA – Experimento Fatorial – Rendimento Carbono Fixo.**

| F. V.       | G. L. | S. Q.     | Q. M.    | F          |
|-------------|-------|-----------|----------|------------|
| Fator1(F1)  | 4     | 17.79706  | 4.44926  | 5.0683 **  |
| Fator2(F2)  | 4     | 237.53801 | 59.38450 | 67.6471 ** |
| Int. F1xF2  | 16    | 151.74521 | 9.48408  | 10.8037 ** |
| Tratamentos | 24    | 407.08028 | 16.96168 | 19.3217 ** |
| Resíduo     | 75    | 65.83930  | 0.87786  |            |
| Total       | 99    | 472.91958 |          |            |

**\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )**

**\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )**

**ns não significativo ( $p \geq .05$ )**