

GHISLAINE MIRANDA

# Potencial Energético de Três Espécies Florestais da Região Semi-Árida do Nordeste do Brasil

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

CURITIBA

1989

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL


P A R E C E R

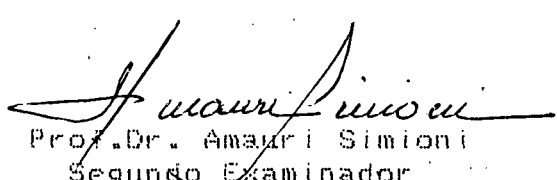
Os membros da Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado apresentada pela candidata GHISLAINE MIRANDA, sob o título "POTENCIAL ENERGÉTICO DE TRÊS ESPÉCIES FLORESTAIS DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE DO BRASIL." para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração: TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS, após haver analisado o referido trabalho e arguido a candidata, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação completando assim os requisitos necessários para receber o grau e o Diploma de Mestre em Ciências Florestais.

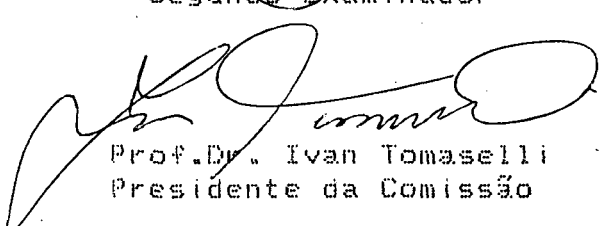
Observação:

O critério de aprovação da Dissertação e Defesa da mesma a partir de novembro de 1980 é apenas, APROVADA ou NÃO APROVADA.

Curitiba, 16 de fevereiro de 1989

  
Prof. M.Sc. Paulo Aguiñelo Gomes  
Primeiro Examinador

  
Prof. Dr. Amauri Simioni  
Segundo Examinador

  
Prof. Dr. Ivan Tomaselli  
Presidente da Comissão



Dedico este trabalho:

à meus pais, Luiz Carlos e Therezinha,  
principais responsáveis pela minha  
formação profissional;

e,

ao amigo, Paulo Aguinélio, pelo incen-  
tivo, orientação e dedicação na rea-  
lização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A autora expressa seus sinceros agradecimentos :

- Ao CNPq e ao PIDD/CAPIES, pela concessão de bolsas de estudo.
- Ao CNPq, através da SUEP, pela concessão de recursos para a impressão deste trabalho.
- À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de realização do curso.
- À Universidade Federal da Paraíba, pela liberação para conclusão do curso.
- Ao orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Ivan Tomaselli e, aos co-orientadores Prof<sup>os</sup> Dr<sup>os</sup>. Amauri Simioni e Sidon Keinerth Júnior e Ms.C. Paulo Aguinélio Gomes, pela orientação na elaboração deste trabalho.
- Aos Prof<sup>os</sup> Olaf Andreas Bakke (UFPB) e Henrique Koehler (UFPR), pela orientação na análise estatística.
- À Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, pela permissão de utilização de seus laboratórios, pessoal técnico e pessoal de apoio.

- Aos laboratoristas Umberto Klock (UFPR), Ricardo Faria e João Kaiser (CETEC), e ao pessoal de apoio do Centro de Carvão Vegetal do CETEC, pelo auxílio no transcorrer da coleta de dados.

- Ao meu irmão, Luiz Carlos Miranda Júnior, e aos demais integrantes da Reditech, pelo auxílio e orientação na utilização de microcomputadores.

- Ao amigo Valdir Mamede de Oliveira, pelo auxílio nos cálculos da análise estatística.

- Aos amigos Graça, Jivaldo, Patrício, Valdir e Williams, meus procuradores durante os períodos de afastamento da cidade de Patos.

- Aos Prof<sup>os</sup> Adeildo Rosa Lima, José Alves Barbosa e Paulo de Mello Bastos, pela substituição nas atividades acadêmicas durante o período de liberação para a conclusão do curso.

- À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## BIOGRAFIA

Ghislaine Miranda, filha de Luiz Carlos e Therezinha Miranda, nasceu em Paranavaí - Pr., em 01 de outubro de 1959.

Iniciou o 1º grau (primário e ginásio) no Grupo Escolar Isa Mesquita e no Colégio Estadual de Umuarama, ambos na cidade de Umuarama - Pr., concluindo seus estudos no Colégio Estadual Pres. Lamenha Lins, em Curitiba - Pr.

Os estudos de 2º grau foram realizados no Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, recebendo a formação de Técnica em Eletrotécnica.

Em julho de 1981 formou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná.

Contratada pela Fundação de Pesquisas da Universidade Federal do Paraná, através do convênio IBDF/Folhosas, exerceu atividades junto à Delegacia Estadual do IBDF no Paraná, durante o período de agosto de 1981 a julho de 1982.

Em dezembro de 1982 foi contratada pela Assessoria Madeireira Florestal para exercer a função de Engº Florestal até a data de dezembro de 1983.

Ingressou no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal - Área de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, a nível de mestrado, em março de 1983.

Em março de 1984, foi contratada, através de concurso público, como professora da área de Tecnologia da Madeira do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal da Paraíba, onde permanece trabalhando até a presente data.

Foi responsável pela montagem e estruturação do Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPB, durante o período de setembro de 1984 a fevereiro de 1988.

## SUMÁRIO

|   |     |
|---|-----|
| LISTA DE FIGURAS .....  | xi  |
| LISTA DE QUADROS .....  | xii |
| RESUMO .....  | xvi |
| <br>  |     |
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 1   |
| <br>  |     |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA .....                                | 4   |
| 2.1. ESPÉCIES UTILIZADAS .....                                | 4   |
| 2.1.1. <i>Leucaena leucocephala</i> Lam (leucena) .....       | 5   |
| 2.1.2. <i>Aspidosperma pyriforme</i> Mart (pereiro) .....     | 8   |
| 2.1.3. <i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul (catingueira) ..... | 9   |
| 2.2. PIRÓLISE DA MADEIRA .....                                | 10  |
| 2.3. DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DOS COMPOSTOS DA MADEIRA .....      | 13  |
| 2.4. PRODUTOS DA PIRÓLISE DA MADEIRA .....                    | 17  |
| 2.5. RENDIMENTOS DOS PRODUTOS DA CARBONIZAÇÃO .....           | 18  |
| 2.5.1. Influência da temperatura .....                        | 19  |
| 2.5.2. Influência do teor de umidade da madeira .....         | 20  |
| 2.6. PROPRIEDADES DOS PRODUTOS DA DESTILAÇÃO SECA .....       | 21  |
| 2.6.1. Carvão vegetal .....                                   | 21  |
| - Composição química .....                                    | 23  |
| - Poder calorífico .....                                      | 27  |



|  |    |
|--|----|
| -Propriedades físicas .....                              | 30 |
| Densidade aparente .....                                 | 30 |
| Densidade verdadeira .....                               | 32 |
| Porosidade .....   | 33 |
| Friabilidade .....                                       | 33 |
| 2.6.2.Líquido pirolenhoso .....                          | 35 |
| -Ácido pirolenhoso .....                                 | 36 |
| -Alcatrão insolúvel .....                                | 36 |
| 2.6.3.Gás não condensável .....                          | 38 |
| <br>   |    |
| 3.MATERIAIS E MÉTODOS .....                              | 39 |
| 3.1.ESPÉCIES UTILIZADAS .....                            | 39 |
| 3.2.LOCAL DE COLETA .....                                | 39 |
| 3.3.AMSTRAGEM E PREPARAÇÃO DO MATERIAL .....             | 40 |
| 3.4.PROPRIEDADES DA MADEIRA .....                        | 41 |
| 3.4.1.Massa específica aparente .....                    | 41 |
| 3.4.2.Teor de umidade .....                              | 42 |
| 3.4.3.Análise química dos constituintes da madeira ..... | 43 |
| 3.5.CARBONIZAÇÃO .....                                   | 45 |
| 3.6.RENDIMENTOS EM BASE SECA .....                       | 47 |
| 3.6.1.Rendimento em peso do carvão vegetal .....         | 48 |
| 3.6.2.Rendimentoem peso do líquido condensado .....      | 49 |
| 3.6.3.Rendimento em peso do gás não condensável .....    | 49 |
| 3.6.4.Rendimento em peso do alcatrão insolúvel .....     | 50 |
| 3.7.PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL .....                 | 51 |
| 3.7.1.Amostragem .....                                   | 51 |
| 3.7.2.Composição química elementar .....                 | 51 |

|   |    |
|---|----|
| 3.7.3. Análise imediata .....                               | 53 |
| Teor de matérias voláteis .....                             | 53 |
| Teor de cinzas .....  | 54 |
| Teor de carbono fixo .....                                  | 54 |
| 3.7.4. Análise das cinzas .....                             | 55 |
| 3.7.5. Rendimento em carbono fixo .....                     | 56 |
| 3.7.6. Poder calorífico superior .....                      | 57 |
| 3.7.7. Propriedades físicas .....                           | 57 |
| Densidade aparente .....                                    | 57 |
| Densidade verdadeira .....                                  | 58 |
| Porosidade .....  | 59 |
| Friabilidade .....  | 60 |
| 3.8. ALCATRÃO INSOLÚVEL .....                               | 60 |
| 3.8.1. Densidade .....                                      | 60 |
| 3.8.2. Teor de umidade .....                                | 61 |
| 3.9. DELINEAMENTO ESTATÍSTICO .....                         | 61 |
| <br>  |    |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                            | 64 |
| 4.1. MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA MADEIRA .....             | 64 |
| 4.2. ANÁLISE QUÍMICA DOS CONSTITUINTES DA MADEIRA .....     | 65 |
| 4.3. RENDIMENTOS DOS PRODUTOS OBTIDOS NS CARBONIZAÇÃO ..... | 66 |
| 4.3.1. Rendimento em carvão .....                           | 67 |
| 4.3.2. Rendimento em líquido pirolenhoso .....              | 72 |
| 4.3.3. Rendimento em gás não condensável .....              | 75 |
| 4.3.4. Rendimento em alcatrão insolúvel .....               | 80 |
| 4.4. PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL .....                   | 84 |
| 4.4.1. Composição química elementar .....                   | 84 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.4.2. Análise química .....   | 85  |
| Teor de carbono fixo .....   | 86  |
| Teor de matérias voláteis .....  | 90  |
| Teor de cinzas .....   | 91  |
| 4.4.3. Análise química das cinzas do carvão .....                            | 97  |
| 4.4.4. Rendimento em carbono fixo .....                                      | 98  |
| 4.4.5. Poder calorífico superior .....                                       | 101 |
| 4.4.6. Propriedades físicas .....  | 105 |
| Densidade aparente .....   | 105 |
| Densidade verdadeira .....   | 109 |
| Porosidade .....   | 114 |
| Friabilidade .....   | 119 |
| 4.5. DENSIDADE E TEOR DE UMIDADE DO ALCATRÃO INSOLÚVEL .....                 | 124 |
| 4.6. ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS TRÊS ESPÉCIES<br>ESTUDADAS ..... | 125 |
| 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....  | 129 |
| SUMMARY .....  | 135 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 137 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| 1. Efeito da temperatura na produção e qualidade do carvão vegetal.....     | 22  |
| 2. Variação do poder calorífico em função do carbono fixo.....              | 29  |
| 3. Localização dos termopares no cadinho.....                               | 47  |
| 4. Fluxograma de amostragem.....  | 52  |
| 5. Rendimento em carvão vegetal em porcentual em função da temperatura..... | 70  |
| 6. Rendimento do líquido pirolenhoso em função da temperatura...            | 74  |
| 7. Rendimento em gás não condensável em função da temperatura...            | 79  |
| 8. Rendimento em alcatrão em função da temperatura.....                     | 82  |
| 9. Teor de carbono fixo em função da temperatura.....                       | 88  |
| 10. Teor de materiais voláteis em função da temperatura.....                | 92  |
| 11. Teor de cinzas em função da temperatura.....                            | 95  |
| 12. Rendimento em carbono fixo em função da temperatura.....                | 100 |
| 13. Poder calorífico em função da temperatura.....                          | 104 |
| 14. Densidade aparente do carvão vegetal em função da temperatura.....      | 107 |
| 15. Densidade verdadeira do carvão vegetal em função da temperatura.....    | 113 |
| 16. Porosidade do carvão vegetal em função da temperatura.....              | 116 |
| 17. Friabilidade do carvão vegetal em função da temperatura.....            | 123 |
| 18. Equivalente em tonelada de petróleo por hectare.....                    | 128 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| 1. Etapas da pirólise da madeira.....   | 12 |
| 2. Composição química elementar da madeira.....   | 13 |
| 3. Composição química média da madeira de <i>Eucalyptus spp.</i> .....  | 16 |
| 4. Análise dos compostos químicos do carvão de <i>Pinus caribea</i> .....   | 17 |
| 5. Destilação a seco de <i>Eucalyptus grandis</i> .....   | 18 |
| 6. Rendimento em peso, base seca, das frações obtidas<br>da destilação de <i>Eucalyptus grandis</i> .....           | 20 |
| 7. Porcentagem de cinzas aceitável para cada aplicação.....   | 23 |
| 8. Composição elementar e rendimento do carvão vegetal em<br>função da temperatura de carvão.....                   | 25 |
| 9. Análise química das cinzas de <i>Eucalyptus sp.</i> .....  | 27 |
| 10. Evolução do poder calorífico em função da temperatura.....  | 29 |
| 11. Variação da densidade do carvão vegetal em função da<br>densidade da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> ..... | 30 |
| 12. Alterações dimensionais ocorridas após a conversão da<br>madeira para carvão.....                               | 31 |
| 13. Poder absorvente de 1 cm <sup>3</sup> de carvão vegetal.....  | 33 |
| 14. Escala de friabilidade do carvão vegetal.....   | 34 |
| 15. Poder calorífico do alcatrão em função da umidade.....  | 37 |
| 16. ANOVA para tratamentos com três repetições.....   | 62 |
| 17. ANOVA para tratamentos com duas repetições.....   | 63 |
| 18. Massa específica aparente e teor de umidade das<br>espécies estudadas.....                                      | 64 |

|  |    |
|--|----|
| 19. Análise química da madeira em porcentual.....  | 66 |
| 20. Rendimentos em peso do carvão vegetal, tomados em base<br>seca, em função da temperatura de carbonização.....                                      | 67 |
| 21. Análise de variância do rendimento em carvão vegetal.....  | 69 |
| 22. Quadro comparativo de médias. Rendimento em carvão vegetal....   | 71 |
| 23. Rendimentos em peso do líquido pirolenhoso, tomados em<br>base seca, das três espécies utilizadas em função da<br>temperatura de carbonização..... | 72 |
| 24. Análise de variância do rendimento em líquido pirolenhoso.....   | 75 |
| 25. Rendimentos em peso do gás não condensável, tomado em<br>base seca, das três espécies utilizadas em função<br>da temperatura de carbonização.....  | 76 |
| 26. Análise de variância do rendimento em gás não condensável.....   | 77 |
| 27. Quadro comparativo de médias . Gás não condensável.....  | 78 |
| 28. Rendimentos em peso do alcatrão insolúvel, tomados em<br>base seca, das três espécies utilizadas em função<br>da temperatura de carbonização.....  | 80 |
| 29. Análise de variância dos rendimentos em alcatrão.....  | 81 |
| 30. Quadro comparativo de médias. Rendimento em alcatrão<br>insolúvel.....   | 83 |
| 31. Composição química elementar do carvão vegetal,<br>tomado em base seca.....  | 85 |
| 32. Teor de carbono fixo, base seca, das espécies utilizadas<br>em função da temperatura de carbonização.....  | 86 |
| 33. Análise de variância das porcentagens dos teores<br>de carbono fixo.....   | 87 |
| 34. Quadro comparativo de médias. Teor de carbono fixo.....  | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| 35. Teor de materiais voláteis, base seca, das três espécies utilizadas em função da temperatura de carbonização..... | 90  |
| 36. Teor de cinzas, base seca, das três espécies utilizadas em função da temperatura de carbonização.....             | 91  |
| 37. Análise de variância do teor de cinzas do carvão vegetal.....   | 94  |
| 38. Quadro comparativo de médias. Teor de cinzas no carvão vegetal.....   | 96  |
| 39. Análise química das cinzas do carvão vegetal.....   | 98  |
| 40. Rendimentos em carbono fixo em função da temperatura de carbonização.....   | 99  |
| 41. Poder calorífico do carvão vegetal obtido para as espécies testadas em função da temperatura de carbonização....  | 101 |
| 42. Análise de variância do poder calorífico superior do carvão vegetal.....  | 102 |
| 43. Quadro comparativo de médias. Poder calorífico do carvão vegetal.....   | 103 |
| 44. Densidade aparente do carvão vegetal das espécies utilizadas em função da temperatura de carbonização.....        | 105 |
| 45. Análise de variância da densidade aparente do carvão vegetal..  | 108 |
| 46. Quadro comparativo de médias. Densidade aparente do carvão vegetal.....   | 109 |
| 47. Densidade verdadeira do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.....                              | 110 |
| 48. Análise de variância da densidade verdadeira do carvão vegetal.....   | 111 |

|  |     |
|--|-----|
| 49. Quadro comparativo de médias. Densidade verdadeira do carvão vegetal.....  | 112 |
| 50. Porosidade do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização..... | 115 |
| 51. Análise de variância para a porosidade do carvão vegetal.....              | 117 |
| 52. Quadro comparativo de médias. Porosidade do carvão vegetal....             | 118 |
| 53. Porcentual de finos, abaixo de 12mm, após o teste de tamboramento.....     | 119 |
| 54. Análise de variância do porcentual de finos abaixo de 12mm....             | 121 |
| 55. Quadro comparativo de médias. Porcentual de finos abaixo de 12mm.....      | 121 |
| 56. Densidade à 25 °C e teor de umidade do alcatrão insolúvel.....             | 124 |
| 57. Quantificação do material seco disponível por hectare.....                 | 125 |
| 58. Potencial energético das três espécies estudadas.....                      | 126 |



## RESUMO

A caatinga, vegetação característica da região semi-árida do Nordeste do Brasil, possui potencial de utilização restrito devido ao seu porte arbóreo-arbustivo. Buscando ampliar a abrangência das aplicações tecnológicas desta vegetação, procurou-se estudar a viabilidade da transformação em carvão vegetal de três espécies vegetais que ocorrem nesta região: a exótica leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) e as nativas catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart).

As três essências foram carbonizadas, separadamente, em retorta elétrica, utilizando-se uma taxa de aquecimento de 0,625 °C/min e quatro temperaturas de carbonização: 350, 450, 550 e 750 °C.

Foram avaliados os rendimentos em peso dos produtos da carbonização (carvão, líquido pirolenhoso, gás não condensável e alcatrão insolúvel), bem como as propriedades químicas (composição química elementar, análise imediata, análise das cinzas e poder calorífico) e físicas (densidades aparente e verdadeira, porosidade e friabilidade).

Algumas propriedades das espécies vegetais também foram avaliadas e incluem a massa específica aparente, teor de umidade e determinação dos constituintes da madeira (celulose, hemicelulose, lignina e extrativos).

O rendimento gravimétrico do carvão vegetal obtido com a carbonização das três espécies apresentou-se dentro da média dos resultados obtidos com outras essências vegetais. Ocorreu uma di-

minuição no rendimento gravimétrico com a elevação da temperatura de carbonização.

Os rendimentos em peso do líquido pirolenhoso e do alcatrão insolúvel não sofreram influência da temperatura de carbonização. No entanto, o gás não condensável aumentou com a elevação da temperatura.

A temperatura de carbonização influenciou todas as propriedades químicas do carvão, exceto o seu poder calorífico. O carbono total, carbono fixo e teor de cinzas aumentaram com a elevação da temperatura.

O teor de cinzas encontrado, entre 7,73 e 8,86 %, foi superior ao apresentado por outras espécies florestais.

A densidade verdadeira do carvão aumentou com a elevação da temperatura. Para a densidade aparente e friabilidade este aumento só ocorreu entre as temperaturas de 450 e 550 °C.

Não foi possível estabelecer uma correlação entre as propriedades do carvão vegetal com os constituintes das madeiras estudadas.

A leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) apresentou carvão vegetal com as melhores propriedades químicas.

A estimativa do potencial energético das três espécies para a região semi-árida do Nordeste do Brasil, em tonelada equivalente de petróleo, é de: 0,57 tep/ha para a *Leucaena leucocephala* Lam, 0,68 tep/ha para a *Caesalpinia pyramidalis* Tul e 0,29 tep/ha para a espécie *Aspidosperma pyrifolium* Mart.

## 1. INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil apresenta uma vegetação predominante denominada caatinga. A caatinga caracteriza-se pelo porte arbóreo-arbustivo e baixa produtividade madeireira, restringindo o potencial de utilização da vegetação.

Apesar da baixa produtividade, a região semi-árida do Nordeste constitui-se em grande consumidora de carvão e lenha para o suprimento da energia necessária às atividades como a mineração, indústrias de calcário, cerâmica, cimento e, recentemente, a indústria siderúrgica que vem se implantando no semi-árido.

O carvão vegetal torna-se a cada dia uma importante fonte energética no contexto regional, pois as florestas naturais, além de serem um recurso energético renovável, possibilitam a coleta de material para a população de baixa renda. Porém, não existem planejamentos e estudos para orientar a exploração florestal para fins energéticos, incorrendo em um sistema de produção realizado por pequenos produtores independentes, responsáveis por cerca de 60 % da produção, que utilizam sistemas primitivos e madeiras heterogêneas.

A grande variedade de madeiras usadas como matéria-prima, e ainda, a utilização de processos de carbonização sem controle operacional, acarretam enorme variação das características do carvão vegetal.

Dados fornecidos através do Balanço Energético Nacional de 1987<sup>00</sup> demonstram que no Brasil, o maior mercado para o carvão vegetal engloba, principalmente, as indústrias siderúrgicas e cimenteira que consomem cerca de 70,0 % e 11,0 % da produção nacional, respectivamente. Tendo em vista que a qualidade do carvão vegetal tem influência significativa sobre os índices de produtividade e consumos específicos dos equipamentos destas indústrias, surge, a necessidade de conhecer os rendimentos e propriedades dos produtos da pirólise da madeira, fato que possibilitará otimizar o processo da destilação, considerando-se o aumento no aproveitamento de espécies florestais que, devidamente testadas e estudadas, permitirão a maximização do rendimento final do produto.

Este trabalho teve como objetivo principal a avaliação dos rendimentos dos produtos da pirólise e propriedades químicas e físicas do carvão vegetal produzido a partir de três espécies florestais que ocorrem no semi-árido nordestino, sendo duas nativas, as quais, juntamente com a jurema-preta (*Mimosa hostilis* Benth), são as espécies da região do semi-árido paraibano mais utilizadas na produção de lenha e carvão : a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) e, ainda, uma exótica de rápido crescimento: a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam), que pelo seu bom desenvolvimento apresentado na região semi-árida, e ainda, pela versatilidade de aplicações apresentadas na sua região de origem, surge como espécie promissora para múltiplas utilizações, inclusive para fins energéticos. Os resultados obtidos fornecem subsídios para a implantação de um

programa que vise a melhoria da qualidade do carvão vegetal da região, bem como a melhoria do índice de conversão madeira/carvão vegetal e recuperação dos produtos da destilação da madeira, viabilizando a exploração racional e valorização relativa dos recursos energéticos naturais da região Semi-Árida.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. ESPÉCIES UTILIZADAS

A vegetação característica da caatinga, devido ao seu porte arbóreo-arbustivo com muitas ramificações e fustes tortuosos e retorcidos, limita a sua aplicação para fins industriais. Sua utilização tem sido restrita apenas para estacas, lenha e carvão vegetal.

Apesar de existirem dados do uso da transformação da madeira em carvão vegetal desde as datas de 4000 a 1800 A.C.<sup>15</sup>, são raras as informações à respeito das propriedades do carvão vegetal de espécies ocorrentes na caatinga.

A leucena (*Leucaena leucocephala* Lam), o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) e a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul), apresentam-se como espécies ocorrentes na região semi-árida promissoras para a transformação em carvão vegetal de boa qualidade para diversas aplicações. As três espécies possuem a peculiaridade de possuírem alta resistência à seca e desenvolverem-se em solos rasos e pedregosos tão característicos no semi-árido nordestino.

No entanto a escassez de referências bibliográficas à respeito de dados silviculturais, dendrométricos e das propriedades tecnológicas destas espécies dificultam a comparação dos resultados obtidos em pesquisas realizadas na região.

### 2.1.1. *Leucena leucocephala* Lam (leucena)

A leucena é uma planta da família Leguminosae, sub-família Mimosoidae, originária da América Central, possuindo dez espécies e mais de cem variedades que podem ser classificadas dentro de três tipos: o havaiano, o salvador (ou guatemala) e o peru <sup>22</sup>.

A espécie desenvolve-se bem em regiões com precipitação entre 600 a 1700 mm/ano de chuvas, adapta-se à temperaturas elevadas e altitudes inferiores à 500 m<sup>29</sup>. Apresenta grande resistência à seca e não perde as folhas durante a estiagem. Trata-se de uma essência versátil, de porte arbóreo-arbustivo que vem sendo muito utilizada como forrageira, lenha, carvão vegetal, sombreamento de culturas, adubo verde e proteção do solo.

A NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE<sup>29</sup> realizou testes das propriedades da madeira encontrando as seguintes características gerais: a espécie possui casca fina e lenho de coloração clara. Madeiras entre 6 a 8 anos de idade apresentam uma massa específica média de 0,54 g/cm<sup>3</sup>. Na determinação da composição química da madeira de leucena com 1,5 ano de idade foram encontrados os seguintes percentuais médios: 71,80 % de holocelulose, 16,85 % de pentosanas, 23,00 % de lignina, 0,85 % de cinzas e 2,15 % de solúveis em álcool-benzeno.

Através de observações de cortes histológicos realizadas no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal da Paraíba, constatou-se a presença de cristais romboédricos nas células parenquimáticas do lenho da leucena.

As técnicas silviculturais utilizadas e a variedade da espécie têm grande influência na utilização final da madeira. Na América Central aconselha-se espaçamento de 1m x 3m para fins industriais. Porém, CUNHA<sup>12</sup>, após a realização de vários experimentos, discorda e sugere espaçamento de 1m x 1m, com desbaste de 50 % de intensidade no 2º ano após o plantio e corte raso no 4º ano para as condições edafo-climáticas brasileiras.

Na sua região de origem a leucena chega a atingir 18 m de altura e 21 cm de DAP entre 6 a 8 anos de idade, podendo ser utilizada para moirões e postes<sup>22</sup>.

O tipo salvador que apresenta incrementos na ordem de 30 a 40 m<sup>3</sup>/ha/ano é a mais apropriada para celulose e compensado. O rendimento da polpa é de cerca de 52 %<sup>29</sup>. O tipo havaiano é a mais indicada para lenha e carvão, sendo originária da costa do México e, atualmente, encontra-se disseminada em quase todas as regiões tropicais. As plantas apresentam porte baixo (5 m) e florescimento precoce (entre o 4º e o 6º mês) e a rebrota atinge 4 m no final do 1º ano<sup>27</sup>.

LIMA<sup>22</sup> cita dados coletados por CURRAN & BREWBAKER que obtiveram um volume total de 160 m<sup>3</sup>/ha, para uma rotação de 4 anos, dos quais 40 m<sup>3</sup>/ha poderiam ser destinados para lenha e carvão. Esta produtividade é variável de acordo com o local de plantio e a estimativa em peso da quantificação do carvão vegetal situa-se em uma faixa de 12 a 24 t/ha/ano, conclui o mesmo autor.

Determinações de poder calorífico indicam para a madeira seca, com 10,9 % de umidade, um valor de 3895 kcal/kg e 7250 kcal/kg para o carvão vegetal<sup>29</sup>. Nestes estudos foram também



determinados o teor de cinzas da madeira e do carvão vegetal obtendo-se 1,62 % e 1,0 % de cinzas, respectivamente. Infelizmente estas literaturas não citam quais as condições de carbonização utilizadas para a obtenção do carvão vegetal testado.

Outras pesquisas, realizadas por CUNHA<sup>12</sup>, indicam que um hectare de leucena entrando em corte aos cinco anos de idade, produzirá o equivalente a um poder calorífico de 92,9 barris de petróleo.

No Brasil, a espécie tem sido muito difundida na região Nordeste, podendo ser encontrada em vários outros estados como São Paulo, Goiás e Paraná. Porém, as referências apresentadas pela literatura brasileira referem-se à dados silviculturais e aspectos nutricionais da espécie.

Com porte de árvore ou arbusto, variando de 5 a 18 m de altura, DAP atingindo até 30 cm tem sido muito difundida na região Nordeste devido ao seu grande potencial apresentado para reflorestamento, tendo em vista o seu bom desenvolvimento na região semi-árida. Na região de Petrolina - PE apresenta um incremento médio anual de 2,42 m<sup>3</sup>/ha/ano e volume de 6,65 m<sup>3</sup>/ha aos 33 meses de idade. Em Quixadá - ES um plantio de leucena com espaçamento 3m x 3m apresentava uma altura média de 7,1 m e DAP médio de 6,0 cm aos 75 meses de idade. PIRES<sup>13</sup> cita um incremento volumétrico anual de 2,3 m<sup>3</sup>/ha para região semi-árida. Em observações realizadas por RIBEIRO<sup>14</sup> constatou-se que com dois anos de idade a leucena plantada na região nordestina pode entrar em regime de corte para lenha e carvão.

### 2.1.2. *Aspidosperma pyriforme* Mart (pereiro)

Espécie pertencente à família Apocynaceae, abundante na caatinga, tendo chegado a ocupar 50 % de sua composição florística na década de 20<sup>as</sup>. Atualmente, ocupa, juntamente com a jurema-preta e a catingueira, a primeira posição em frequência nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte e apresenta os seguintes volumes por hectare: 4,60 m<sup>3</sup> de lenha e 1,24 m<sup>3</sup> de madeira<sup>99</sup>.

A espécie possui porte regular, de casca lisa e acinzentada com espessura de 2,0 a 5,0 mm<sup>100</sup>.

Suas características gerais e anatômicas foram determinadas por SILVA<sup>42</sup> que descreve a madeira com cerne de coloração bege e alburno amarelo pálido. A grã é direita, textura fina e uniforme e moderadamente pesada. Anatomicamente foram observadas fibras de paredes delgadas (4,71  $\mu$  m de espessura), poros extremamente numerosos (178 poros/mm<sup>2</sup>) porém pequenos (43,00  $\mu$  m de diâmetro) e presença de parênquima axial. Estes dados divergem de descrições realizadas por PAULA<sup>97</sup>, que cita o parênquima axial ausente e número de poros/mm<sup>2</sup> extremamente elevado (812 poros/mm<sup>2</sup>). Em observações de cortes histológicos da madeira de pereiro, realizadas no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal da Paraíba foi confirmada a presença de parênquima axial no pereiro procedente da região de Patos - PB. A constatação da presença de cristais romboédricos de oxalato de cálcio nas células parenquimáticas foi realizada por SILVA<sup>42</sup> e PAULA<sup>97</sup>. Este último autor atribui a grande quantidade de cristais encontrados ao efeito de fatores ambientais, principalmente a luz e déficit

hídrico do solo. Esta teoria não está explicada claramente pelo autor, merecendo estudos posteriores.

A madeira possui massa específica que varia entre 0,68 a 0,70 g/cm<sup>3</sup>, relata PAULA<sup>37</sup>, e presta-se a serviços de marcenaria e carpintaria além de ser muito utilizada na produção de carvão na região semi-árida<sup>38</sup>.

### 2.1.3. *Caesalpinia pyramidalis* Tul (catingueira)

Planta característica das caatingas de porte arbóreo-arbustivo pertencente à família Leguminosae Caesalpinoideae, ocorrendo desde o Piauí até a Bahia, inclusive Mato Grosso. Em inventário florestal realizado nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte foram determinados os seguintes volumes por hectare: 1.64 m<sup>3</sup>/ha de madeira e 5,46 m<sup>3</sup>/ha de lenha<sup>39</sup>.

Descrições microscópicas demonstram que a espécie possui poros poucos numerosos (28 poros/mm<sup>2</sup>) e de tamanho pequeno (69 μm de diâmetro), fibras de paredes delgadas (0,43 μm de espessura) e parenquima axial presente<sup>42</sup>. SILVA<sup>42</sup> e PAULA<sup>37</sup> observaram, também, a presença de tilos e cristais romboédricos de oxalato de cálcio nas células parenquimáticas.

Estudos indicam que a madeira possui cerne de coloração cinza escuro e alburno mais claro. A grã é direita, textura fina e é moderadamente pesada e de difícil trabalhabilidade<sup>42</sup>. Sua massa específica foi determinada por PAULA<sup>37</sup> e situa-se entre 0,82 a 0,85 g/cm<sup>3</sup>. O mesmo autor registrou a presença de grande quantidade de celulose e lignina, não especificando numericamente

esta quantificação, indicando a espécie para ser utilizada para a produção de álcool combustível, carvão e coque metalúrgico.

A potencialidade da catingueira como combustível energético também foi relatada por BRAGA<sup>95</sup> que indica a espécie para a produção de carvão, lenha e estacas.

## 2.2. PIRÓLISE DA MADEIRA

Pirólise é o processo pelo qual a madeira é aquecida em ambiente fechado com exclusão de ar havendo a sua transformação em gases, vapores d'água, líquidos orgânicos, alcatrões e carvão<sup>48</sup>. Segundo FERREIRA<sup>46</sup> esta definição tem sido utilizada por vários autores para definir, também, os processos de carbonização e destilação seca da madeira. Estas distinções das diversas denominações atribuídas ao processo de transformação da madeira em carvão também foi constatada por REZENDE<sup>49</sup>, que acrescenta à definição que a pirólise é uma etapa que precede a combustão da madeira e que os gases e vapores formados na pirólise darão origem às chamas, enquanto o carvão sofrerá combustão incandescente.

A pirólise da madeira consiste em quatro fases segundo BROWNE, citado por REZENDE<sup>49</sup>:

Fase nº 01: Secagem - Abaixo de 200°C e consiste basicamente na evaporação da água contida na madeira sob as formas:

Higroscópica, no lúmen das células: até 110 °C.

Absorvida pelas paredes das células: 110 a 150 °C

Quimicamente ligada: 150 a 200 °C.

Nesta fase são formadas pequenas quantidades de dióxido de carbono, glioxal, ácidos fórmico e acético.

Fase nº 02: Pré-pirólise - De 200 a 280 °C, fase endotérmica do processo na qual as macromoléculas, principalmente as hemieluloses e celulosas, seriam quebradas por reações de desidratação ou despolimerização com provável formação de radicais livres, formando produtos primários. Os mesmos gases da primeira fase são gerados com maior intensidade, exceto vapor d'água, surgindo aqui pequenas quantidades de monóxido de carbono.

Fase nº 03: Pirólise - De 280 a 500 °C, período caracterizado por uma reação exotérmica intensa onde ocorrem reações de decomposição e interação (desidratação, policondensação e rearranjos) dos produtos formados anteriormente. Os produtos finais são altamente combustíveis (CO, CH<sub>4</sub>, e outros) e incluem os alcatrões em forma de névoa altamente inflamável. A maior parte do alcatrão e ácido pirolenhoso são produzidos durante esta fase entre as temperaturas de 250 a 300 °C. O carvão residual atua como catalizador das reações secundárias.

Fase nº 04: Fase final - Acima de 500 °C, o carvão residual é na maior parte carbono fixo, sofrendo modificações estruturais devido às reações secundárias adicionais, as quais liberam uma pequena quantidade de voláteis, notadamente hidrogênio.

Estudos realizados por MARTINS<sup>24</sup> citam a determinação das etapas da pirólise da madeira e apresentaram resultados similares ao descrito anteriormente, conforme mostra o Quadro nº 01.

Quadro nº 01 - Etapas da pirólise da madeira

| Etapa         | Temperatura °C | Produtos  |
|---------------|----------------|---|
| 1.Endotérmica | 100 - 200      | H <sub>2</sub> O  |
| 2.Endotérmica | 170 - 270      | CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O,<br>CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H,<br>alcatrão.  |
| 3.Exotérmica  | 270 - 280      | CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> ,<br>CH <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> OH,<br>CH <sub>3</sub> CHO, CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H,<br>alcatrão. |
| 4.Exotérmica  | 280 - 400      | H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> ,<br>hidrocarbonetos.  |

FONTE : Forest Energy and Economic Development, D.E. Earl, 1985.

UHART <sup>44</sup> concorda com estas etapas quando descreve os fenômenos da destilação seca da madeira com a elevação da temperatura:

150 a 200 °C: Ocorre a vaporização da água mecânicamente ligada à madeira.

200 a 280 °C: Dá-se a liberação de CO e CO<sub>2</sub>, acompanhados de pequena quantidade de vapores condensáveis contendo ácido acético e metanol. Os alcatrões formados são ainda insignificantes.

280 a 380 °C: Inicia uma reação exotérmica de decomposição a temperatura de 280 °C. Durante esta fase exotérmica a composição dos gases modifica-se, pois os gases oxigenados desaparecem em benefício do metano e de um pouco de hidrogênio. A formação de ácido e de "espírito da madeira" (metanol, acetona de metila e álcool alílico) atingem o seu máximo.

380 a 500 °C: Entra-se na fase de dissociação do carvão. A liberação de hidrocarbonetos aumenta até 500 °C e obtém-se uma quantidade importante de alcatrão.

Acima de 500 °C: Os hidrocarbonetos são pouco a pouco substituídos pelo hidrogênio, o processo é conhecido como fase hidrogênio.

Nota-se que existe uma concordância entre os autores citados em relação às etapas do processo de pirólise da madeira, havendo apenas um maior detalhamento entre uma descrição e outra.

### 2.3. DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DOS PRINCIPAIS COMPOSTOS DA MADEIRA

Os efeitos observados na decomposição da madeira, são um somatório dos efeitos observados na decomposição individual de seus principais componentes: celulose, hemicelulose e lignina.

Para a melhor compreensão destes efeitos, é necessário o conhecimento da composição elementar média da madeira seca que pode ser visualizada na Quadro nº 02.

Quadro nº 02 - Composição química elementar da madeira

| Elemento químico | Porcentual (%) |
|------------------|----------------|
| Carbono          | 50,00          |
| Hidrogênio       | 6,00           |
| Oxigênio         | 44,00          |
| Nitrogênio       | 0,20           |
| Cinzas           | 0,50           |

Estes elementos químicos sofrem combinações durante o processo de fotossíntese e originam os compostos que constituem a madeira nas seguintes proporções, segundo UHART<sup>44</sup>:

1. Celulose verdadeira ou corrigida correspondente a glucose obtida por sacarificação total - 30 a 50 %.
2. Pentosanas ou hemicelulose compreendendo xilanas, arabanas e grupos urônicos - 9 a 28 %.
3. Mananas e galactanas em quantidades insignificantes nas madeiras folhosas (sempre presente, pelo contrário, nas coníferas) - 0 a 12 %.
4. Lignina na proporção de 22 a 45 %.
5. Extrativos que compreendem os óleos, resinas, gomas, ceras, gorduras, óleos essenciais solúveis em álcool-benzeno, éter e água em ebulição. A natureza das resinas e as transformações que elas sofrem durante a destilação, influem consideravelmente na qualidade dos alcatrões - 25 %.

A celulose, o composto que existe em maior proporção na estrutura da madeira, pode ser decomposta através do seguinte mecanismo proposto por KILZER & BROIDO citados por REZENDE<sup>45</sup>:

1. Desidratação da celulose a temperaturas de aproximadamente 220 °C, envolvendo a perda da água de constituição e produção de "dehidrocelulose".
2. Despolimerização: ocorre com a volatilização de produtos que torna-se evidente a 280 °C, competindo com a desidratação até mais ou menos 340 °C. A despolimerização, causada pelo rompimento de ligações glicosídicas entre monômeros, seguido de mudanças de con-



formação e rearranjos internos destes anéis, produz levoglucosana que é um isômero do monômero da celulose e um dos principais constituintes do alcatrão formado na pirólise da celulose, chegando a 50 % deste produto.

3. Decomposição da dehidrocelulose formada na primeira fase, através de uma ou mais reações exotérmicas, em vários produtos gasosos ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e outros) e residual (carvão).

As hemiceluloses que são componentes de menor estabilidade térmica, decompõem-se à temperaturas mais baixas que a celulose fato atribuído a sua natureza amorfa, segundo DOMANSKY & RENDOS, citados por REZENDE<sup>46</sup>. Sua degradação tem início a 225 °C sendo quase completa a 325 °C, com a conseqüente formação de ácido acético<sup>45</sup>.

A lignina, por sua vez, começa a degradar-se a 280 °C, completando o processo entre 450 e 550 °C, dando como resultado um resíduo carbonoso relatam KUDO & YOSHIDA, citados por REZENDE<sup>46</sup>.

A quantidade de lignina na madeira influencia no produto da carbonização de acordo GOMES & OLIVEIRA<sup>47</sup> que demonstram que o rendimento gravimétrico do carvão sofre um aumento de 26 para 30 % quando o teor de lignina da madeira passa de 21 para 29 %, e o teor de carbono fixo de 74 para 78 %, quando o percentual de lignina na madeira se eleva de 21 para 31 %.

Esta teoria é confirmada por SHAFIZADEH & CHIN, citados por REZENDE<sup>46</sup>, e, também, por BRITO & BARRICHELO<sup>47</sup> que afirmam que a lignina é a principal responsável pela formação do carvão. O aumento do rendimento em carvão e a resistência à compressão com a

elevação do teor de lignina também foram observados em experimentos conduzidos por WISE et alii<sup>49</sup>. JUVILLAR<sup>21</sup> acrescenta, ainda, que o rendimento em alcatrão insolúvel aumenta com o teor de lignina na madeira. Outros estudos ampliam a abrangência da influência do teor de lignina da madeira nos rendimentos dos produtos da carbonização<sup>10</sup>. O experimento consistiu na carbonização da lignina, entre as temperaturas de 450 e 550 °C, encontrando um rendimento de 55 % de carvão, 15 % de alcatrão (compostos fenólicos), 20 % de líquido condensado (água, metanol, acetona, e ácido acético) e 12 % de gás não condensável (CO, CO<sub>2</sub> e etano).

No Quadro nº 03 podem ser observadas as médias da composição química de *Eucalyptus* spp.

Quadro nº 03 - Composição química média da madeira de *Eucalyptus* spp.

| Idade (anos) | Extrativos em álcool benzeno | Teores de |              |         |        |
|--------------|------------------------------|-----------|--------------|---------|--------|
|              |                              | celulose  | hemicelulose | lignina | cinzas |
|              | %                            | %         | %            | %       | %      |
| 4            | 2,0                          | 47,8      | 18,2         | 26,4    | 0,3    |
| 5            | 2,6                          | 52,5      | 13,0         | 25,0    | 0,3    |
| 8            | 1,6                          | 61,5      | 18,8         | 18,7    | 0,3    |
| 13           | 1,7                          | 57,4      | 16,9         | 21,6    | 0,2    |
| 20           | 2,1                          | 45,0      | 27,8         | 16,8    | 0,3    |

Fonte: PRODEPEF - PNDU - FAO/IBDF/BRA. - 45 - 1976

A variação do percentual dos compostos químicos do carvão ocorre entre as espécies e dentro da própria espécie utilizada, conforme demonstram BRITO & NUCCI<sup>50</sup> que, carbonizando três va-

riedades de *Pinus caribea* encontraram os resultados demonstrados no Quadro nº 04.

Quadro nº 04. Análise dos compostos químicos do carvão de *Pinus caribea*.

| Composto                   | hondurensis<br>% | bahamensis<br>% | oocarpa<br>% |
|----------------------------|------------------|-----------------|--------------|
| Holocelulose               | 65,80            | 64,70           | 62,00        |
| Lignina                    | 31,80            | 33,60           | 31,00        |
| Extrativo (álcool-benzeno) | 05,10            | 05,10           | 05,30        |

#### 2.4. PRODUTOS DA PIRÓLISE DA MADEIRA.

Todo vegetal submetido ao aquecimento é decomposto produzindo três frações:

1. Fração sólida: carvão vegetal

2. Fração gasosa: gases voláteis não condensáveis. São combustíveis contendo dióxido de carbono, nitrogênio, monóxido de carbono, hidrogênio, metano, etileno.

3. Fração líquida: líquido pirolenhoso. Esta fração é constituída por duas partes:

- Ácido pirolenhoso, de coloração castanho-avermelhado constituído de ácido acético, metanol, alcatrão solúvel (alcatrão B), acetona e outros componentes de menor importância.

- Alcatrão insolúvel (alcatrão A), de coloração negra, denso e viscoso, constituído por uma mistura de vários compostos. De acordo com DISCACCIATTI<sup>14</sup>, o alcatrão vegetal é uma mistura de compostos químicos pesados, de ponto de ebulição elevado e que nas

condições de carbonização se encontram diluídos no gás não condensável e vapores pirolenhosos. Esta mistura gasosa é muito instável e tende a supersaturar-se fazendo com que os vapores de alcatrão se condensem, com muita facilidade, no seio desta mesma mistura formando uma fina névoa, que é uma suspensão de microgotas. Esta névoa de alcatrão é arrastada pelo fluxo gasoso e sua recuperação só é possível através de métodos de separação gás-líquido.

O Quadro nº 05, transcrito de ALMEIDA<sup>1</sup>, mostra os produtos da pirólise a temperatura de 500 °C da espécie *Eucalyptus grandis*.

Quadro nº 05 - Destilação à seco de *Eucalyptus grandis*.

| Produtos                               | Rendimento em peso de madeira seca.<br>% |
|--|--|
| 1.Carvão (86 % de carbono fixo)        | 33,00                                    |
| 2.Ácido pirolenhoso (fração aquosa)    | 35,50                                    |
| Constituintes: 05,0 % de ácido acético |  |
| 02,0 % de metanol                      |  |
| 05,0 % de alcatrão solúvel             |  |
| 23,5 % de água e outros constituintes  |  |
| 3.Alcatrão insolúvel                   | 06,50                                    |
| 4.Gás não condensável                  | 25,00                                    |
| TOTAL                                  | 100,00                                   |

Fonte: CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais.

## 2.5. RENDIMENTOS DOS PRODUTOS DA CARBONIZAÇÃO

Durante o processo de carbonização ocorre uma série de reações químicas que são influenciadas por vários fatores, entre eles, a espécie utilizada, o teor de umidade da madeira e as con-

dições de carbonização e, principalmente, a temperatura de carbonização e velocidade de aquecimento utilizadas.

Alguns aspectos sobre a influência da temperatura de carbonização e teor de umidade da madeira serão abordados a seguir:

#### 2.5.1. Influência da temperatura:

A elevação da temperatura final de carbonização reduz o rendimento em peso de carvão, segundo ALMEIDA, OLIVEIRA et alii, citados por FARIA<sup>15</sup>, tendo como consequência um aumento nos rendimentos em peso de líquidos e gases.

Este fato é explicado por ALMEIDA<sup>16</sup> que sugere que o aumento da temperatura facilita a dissociação do carvão liberando a quantidade de gases nele contido, gaseificando parte de sua estrutura sólida. O mesmo autor relata que o aumento do rendimento em gás não condensável (GNC) é mais acentuado em temperaturas mais baixas, tendendo a estabilizar em temperaturas mais elevadas.

A influência da temperatura nos rendimentos dos produtos da carbonização pode ser verificada no Quadro nº 06 que apresenta os rendimentos obtidos com a destilação de *Eucalyptus grandis* em função da temperatura em experimento realizado por OLIVEIRA et alii<sup>17</sup>.

Quadro nº 06 - Rendimento em peso, base seca, das frações obtidas da destilação de *Eucalyptus grandis*

| Temperatura de Carbonização<br>°C | Rendimento<br>Carvão<br>% | em peso, base seca<br>Líquido<br>% | Gás<br>% |
|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| 300                               | 42                        | 37                                 | 21       |
| 500                               | 33                        | 42                                 | 25       |
| 700                               | 30                        | 44                                 | 26       |

### 2.5.2. Influência do teor de umidade da madeira.

O teor de umidade da madeira influencia nos rendimentos em carvão vegetal, pois a medida que eleva-se o teor de umidade da madeira, ocorre uma diminuição no rendimento em carvão devido ao maior consumo de material, tendo em vista a necessidade de maior quantidade de calor para evaporar a água durante a carbonização.

Dados experimentais comprovam um aumento de 13,27 % no consumo de lenha enforada por combustão quando a umidade da mesma passa de 25 % para 50 %. Na mesma bibliografia, VALENTE<sup>40</sup> transcreve estudos realizados pela Fundação João Pinheiro que mostram que a carbonização em retorta tem os seguintes rendimentos:

- 4 t de madeira verde (50 % de umidade) por tonelada de carvão produzido (25 % de rendimento gravimétrico).
- 3 t de madeira seca ao ar (20 % de umidade) por tonelada de carvão produzido (33 % de rendimento).
- 2,75 t de madeira com 15 % de umidade por tonelada de carvão produzido (36 % de rendimento gravimétrico). Porém, o autor não

especifica se estes rendimentos foram obtidos tomando-se os rendimentos em base seca ou base úmida.

A produção do alcatrão também é influenciada pelo teor de umidade da madeira. CASTRO<sup>10</sup> relata que quando o teor de umidade, tomado em base seca, passa de 35 % para 70 %, o rendimento em alcatrão cai para a metade.

## 2.6. PROPRIEDADES DOS PRODUTOS DA DESTILAÇÃO SECA

A decomposição térmica da madeira, como já foi citado anteriormente, tem como resultado final três produtos básicos: o carvão vegetal, o líquido pirolenhoso e o gás não condensável. As propriedades destes produtos da carbonização servem como indicativos para a utilização mais viável destes produtos. Estas propriedades são diretamente influenciadas pela espécie e o método de carbonização utilizados.

### 2.6.1. Carvão vegetal:

A qualidade do carvão vegetal depende da espécie utilizada, dimensões da matéria-prima e, principalmente, do método de carbonização.

Todas as propriedades do carvão vegetal são afetadas pela temperatura final de carbonização, conforme demonstra a Figura nº 01 apresentada por WENZEL <sup>40</sup>.

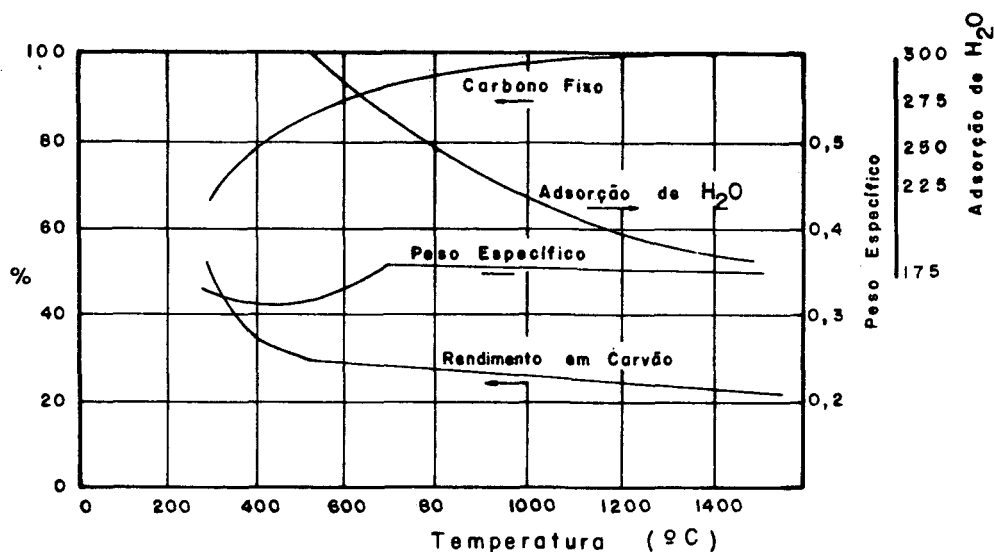


Figura nº 01 - Efeito da temperatura na produção e qualidade do carvão vegetal

Devido a heterogeneidade das espécies e dos variados métodos de carbonização empregados pelos produtores de carvão vegetal, torna-se difícil conseguir um produto que atenda às exigências dos mais variados tipos de consumidores. O carvão vegetal recomendado para utilização em alto-forno deve ser:

Físicamente: o mais denso possível, pouco friável, de granulometria uniforme.

Quimicamente: alto teor de carbono fixo e baixos teores de cinzas e fósforo.



- Composição química:

A composição química do carvão vegetal pode ser determinada através de dois métodos: análise química elementar e análise imediata.

O efeito da variação da composição química do carvão vegetal deve ser analisado isoladamente para cada finalidade de aplicação do produto e apresenta-se como um problema bastante complexo, pois não existe bibliografia de estudos aprofundados para cada caso de utilização de carvão vegetal no país.

A composição elementar do carvão vegetal é expressa em termos dos teores de carbono, oxigênio e hidrogênio e a proporção destes elementos contidos no carvão vegetal varia com a temperatura final de carbonização, conforme demonstra WENZEL <sup>40</sup> no Quadro nº 07.

Quadro nº 07 - Composição elementar e rendimento do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização

| Temperatura de carbonização<br>°C | Composição elementar |       |       | Rendimento<br>% |
|-----------------------------------|----------------------|-------|-------|-----------------|
|                                   | C (%)                | H (%) | O (%) |                 |
| 200                               | 52,30                | 6,30  | 41,40 | 91,80           |
| 300                               | 73,20                | 4,90  | 21,90 | 51,40           |
| 400                               | 82,70                | 3,80  | 13,50 | 37,80           |
| 500                               | 89,60                | 3,10  | 6,70  | 33,00           |
| 600                               | 92,60                | 2,60  | 5,20  | 31,00           |
| 800                               | 95,80                | 1,00  | 3,30  | 26,70           |
| 1000                              | 96,60                | 0,50  | 2,90  | 26,50           |

Observa-se, no Quadro nº 07, que existe uma correlação inversa entre os percentuais de hidrogênio e oxigênio em relação

ao percentual de carbono total, o qual aumenta com a elevação da temperatura de carbonização.

Através da análise imediata determinamos a composição química do carvão vegetal que é analisada em função dos teores de carbono fixo, material volátil, cinzas e umidade contidos neste carvão.

O teor de carbono fixo do carvão vegetal sofre um aumento com a elevação da temperatura de carbonização. Isto ocorre devido a liberação dos compostos gasosos ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e hidrocarbonetos) que consomem mais oxigênio ou hidrogênio do que carbono durante as reações ocorridas durante o processo de carbonização, segundo ALMEIDA <sup>1</sup>.

Na utilização do carvão vegetal em processos siderúrgicos o efeito do teor de carbono fixo presente num carvão é refletido, principalmente, na utilização do alto-forno por unidade de volume<sup>20</sup>. Para o mesmo volume, maior é a utilização do mesmo a medida que o teor de carbono fixo aumenta. No Estado de Minas Gerais, o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do país, a média do teor de carbono fixo recebido pelas siderúrgicas é de aproximadamente 70 %<sup>20</sup>.

Da mesma maneira que a temperatura de carbonização influencia no teor de carbono fixo, também exerce grande influência no teor de matérias voláteis. Contudo, neste caso, existe uma correlação inversa entre a temperatura de carbonização e o teor de materiais voláteis, pois à medida que eleva-se a temperatura de carbonização ocorre a diminuição do teor de materiais voláteis. As consequências da eliminação dos materiais

voláteis encontram-se na modificação estrutural do carvão ocorrendo a mudança das características físicas do mesmo (porosidade, diâmetro médio dos poros, densidade e resistência à compressão). Esta mudança das características físicas influenciam nos processos siderúrgicos podendo alterar o comportamento do carvão vegetal nos aparelhos de redução utilizados na siderurgia, relatam MENDES et alii<sup>20</sup>.

Um outro composto químico de extrema importância na qualidade do carvão vegetal é o teor de cinzas. Devido ao calor gasto no aquecimento, fusão e redução das cinzas sabe-se que quanto menor o teor de cinzas, menor será o consumo de carbono em operações de altos-fornos<sup>21</sup>. A porcentagem de cinzas aceitável para cada aplicação pode ser vista no Quadro nº 08, segundo YOKOYA & MATSUZAKI<sup>22</sup>.

Quadro nº 08 - Porcentagem de cinzas aceitável para cada aplicação.

| Aplicação           | % de cinzas máxima |
|---------------------|--------------------|
| Caldeira            | 2 - 3              |
| Forno para minérios | 20 - 25            |
| Forno para metais   | 15 - 18            |
| Forno para vidro    | 2 - 3              |
| Forno para cerâmica | 2 - 3              |

ASSIS et alii<sup>23</sup> apresentam outros dados fornecidos por empresas do estado de Minas Gerais: a Cia. Siderúrgica Belgo-Mineira utiliza na sinterização carvão vegetal com um teor de cinzas médio de 14,0 %, enquanto a Siderúrgica Acesita consome carvão vegetal com o teor de cinzas variando entre 1,8 a 2,6 %.

REZENDE<sup>40</sup> considera um carvão vegetal de boa qualidade aquele que possui, entre outras propriedades, um teor de cinzas na faixa de 1 a 3 %.

A literatura relata que o teor de cinzas é influenciado pela temperatura de carbonização. PERES<sup>38</sup>, carbonizando a espécie jurema-preta à temperatura de 400 °C, constatou um aumento no teor de cinzas com a elevação da temperatura final de carbonização. Estes resultados concordam com os obtidos por FARIA<sup>45</sup> que também carbonizou a jurema-preta.

No entanto, UHART<sup>44</sup> considera que o teor de cinzas do carvão vegetal é sensivelmente influenciado pela espécie, pois segundo o autor o carvão contém a totalidade das cinzas da madeira, cuja taxa varia consideravelmente com as espécies. As cinzas são compostas, principalmente, por  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e S.

Para a aplicação em processos metalúrgicos OLIVEIRA & ALMEIDA<sup>35</sup> relatam que o teor de cinzas deve ser o menor possível, pois os metais alcalinos produzem efeitos consideráveis na reação  $\text{C} - \text{CO}_2$ . Se esta velocidade for aumentada em temperaturas muito baixas (700 - 800 °C) esta região do alto-forno pode funcionar como gerador de CO, com consumo de carbono sem sua utilização no processo de redução.

A composição química das cinzas também pode influenciar na sua aplicação na siderurgia, devido ao fato de serem ricas em cálcio ( $\text{CaO}$ )<sup>46</sup>. Nos sistemas em que o carvão vegetal é utilizado em combinação com o carvão mineral o componente cinzas pode se tornar merecedor de atenção, visto que o  $\text{CaO}$  pode agir como um

fundente, abaixando a temperatura de fusão das cinzas do carvão, aumentando-se o risco de incrustações de escórias, nas superfícies radiantes de fornalhas. Os mesmos pesquisadores afirmam que elevado teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) no aparelho redutor sofrerá uma redução a  $\text{SiO}$ , onerando o balanço térmico do alto-forno.

Um exemplo de análise química das cinzas pode ser encontrada no Quadro nº 09 que mostra a análise química das cinzas do carvão de *Eucalyptus* sp. realizada pelo OLIVEIRA et alii <sup>22</sup>.

Quadro nº 09 - Análise química das cinzas de *Eucalyptus* sp.

|            | CaO<br>% | $\text{Al}_2\text{O}_3$<br>% | MgO<br>% | $\text{SiO}_2$<br>% | S<br>% |
|------------|----------|------------------------------|----------|---------------------|--------|
| Porcentual | 36,45    | 01,31                        | 08,64    | 00,33               | 00,33  |

Com relação ao teor de umidade pode-se esperar que quanto maior a umidade do carvão vegetal, maior será a quantidade deste produto a ser utilizado no alto-forno, diminuindo o rendimento da produção.

- Poder calorífico:

Poder calorífico de um combustível é o número de calorías liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível, expresso em kcal/kg ou em KJ/kg para combustíveis sólidos e líquidos e kcal/m<sup>3</sup> para combustíveis gasosos.

O poder calorífico de um material combustível pode ser medido através do poder calorífico superior ou através do poder

calorífico inferior. Na prática é preferível utilizar o poder calorífico inferior, visto que o poder calorífico superior inclui o calor de condensação da água da umidade do ar e da gerada na combustão. Isto acontece porque quando ocorre a combustão de um material que possui hidrogênio, resulta na formação de água na forma gasosa a qual, se for condensada, irá liberar calor de condensação, afirma COUTINHO<sup>14</sup>.

A temperatura de carbonização tem grande influência nos resultados de poder calorífico do carvão vegetal. MENDES et alii<sup>20</sup> relatam que o poder calorífico de um carvão vegetal produzido a temperatura final de carbonização de 500 °C é superior ao produzido a temperatura de 700 °C e a 300 °C. Este fato ocorre devido a variação na composição química elementar, pois o teor de oxigênio diminui sensivelmente na faixa de temperatura de 300 a 500 °C. Na faixa de 500 a 700 °C observa-se uma grande diminuição da porcentagem de hidrogênio no carvão superior ao aumento da porcentagem de carbono fixo, segundo SATONAKA, citado por FARIA<sup>15</sup>. Este maior consumo de oxigênio ou hidrogênio irá resultar em maior teor de carbono total que irá elevar o poder calorífico.

A Figura nº 02 apresenta os resultados da carbonização de espécies tropicais e de *Eucalyptus* sp., relacionando poder calorífico superior com teor de carbono fixo, realizado por PETROFF e DOAT, transcrito por MENDES et alii<sup>20</sup>.

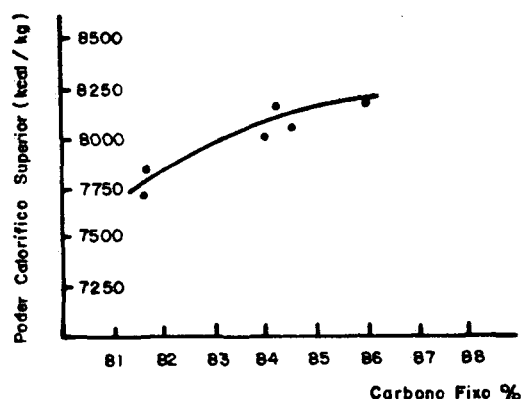


Figura nº 02 - Variação do poder calorífico em função do teor de carbono fixo

Resultados semelhantes foram obtidos por UHART <sup>20</sup> e são apresentados no Quadro nº 10.

Quadro nº 10 - Evolução do poder calorífico em função da temperatura de carbonização.

| Poder calorífico em função da temperatura(kcal/kg) |         |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Temperatura (°C)                                   | 200-280 | 280-380 | 380-500 | 500-700 | 700-900 |
| Poder calorífico                                   | 1210    | 3920    | 4780    | 3630    | 3160    |
| % Carbono fixo                                     | 68      | 78      | 84      | 89      | 91      |

- Propriedades físicas

Densidade aparente:

A densidade aparente expressa a quantidade de matéria lenhosa mais o volume de poros internos do material em questão por unidade de volume.

Os valores de densidade aparente do carvão vegetal são influenciados pela densidade da madeira que lhe deu origem, temperatura e velocidade de carbonização.

Em pesquisas realizadas pelo FORESTY PRODUCTS LABORATORY<sup>17</sup> a densidade aparente do carvão vegetal depende da densidade da madeira e varia entre 0,20 e 0,50 g/cm<sup>3</sup>.

A correlação entre a densidade da madeira e densidade do carvão vegetal está demonstrada na Quadro nº 11. Estes resultados foram obtidos por OLIVEIRA et alii<sup>21</sup> com a espécie *Eucalyptus grandis* com idade entre 6 a 10 anos.

Quadro nº 11 - Variação da densidade do carvão vegetal em função da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis*.

| Densidade aparente da madeira (g/cm <sup>3</sup> ) | Densidade aparente do carvão (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--|---|
| 0,60   | 0,32  |
| 0,64   | 0,39  |
| 0,71   | 0,41  |

A influência da temperatura sobre a densidade aparente do carvão vegetal acontece de maneira peculiar: A densidade aparente



do carvão diminui até 600 °C e aumenta até 800 °C, segundo MENDES et alii<sup>28</sup>. Esta teoria é explicada pelo fato da degradação da celulose e hemicelulose ocorrer até a temperatura de aproximadamente 400 °C. O processo de degradação da lignina é mais lento, estendendo-se até a temperatura de 500 °C, dando como resultado um resíduo carbonoso. Os mesmos autores sugerem que na faixa de 500 a 700 °C o efeito na variação dimensional é superior ao que ocorre com perda de massa, provavelmente devido ao rearranjo estrutural do carbono, resultando em maior densidade aparente para a temperatura de 700 °C.

Estas variações dimensionais diferem nos três eixos da madeira, conforme pode ser observado no Quadro nº 12 que mostra os valores de contração nos eixos transversal (x), radial (r), tangencial (t) e volumétrica (v) resultantes após a conversão da madeira para carvão obtidos por MCGINNES<sup>24</sup>.

Quadro nº 12 - Alterações dimensionais ocorridas após a conversão da madeira para carvão

| Anisotropia | Contração |       |       |       |
|-------------|-----------|-------|-------|-------|
|             | X(%)      | R(%)  | T(%)  | V(%)  |
| 1,73        | 25,68     | 15,45 | 11,43 | 44,60 |

A densidade aparente do carvão vegetal é um dos parâmetros que viabiliza a sua utilização em siderurgia, pois a densidade do carvão vegetal é aproximadamente a metade da densidade do coque siderúrgico. Para uma mesma quantidade de carbono fixo, seu volume é duas vezes superior ao volume ocupado pelo coque<sup>24</sup>.

Um carvão vegetal com densidade aparente alta é desejável como termo-redutor, pois além de ocupar menor espaço no alto-forno para a mesma massa, ainda oferece maior resistência mecânica, registram VALENTE & VITAL<sup>44</sup>.

#### Densidade verdadeira :

A densidade aparente do carvão vegetal pode ser mascarada por trincas ou fissuras internas que surgem durante o processo de carbonização, portanto, GOMES & OLIVEIRA<sup>47</sup> aconselham a obter os valores da densidade verdadeira para avaliar a quantidade de carvão presente em uma amostra.

Densidade verdadeira é a medida da densidade da substância que compõe o carvão vegetal, ou seja, é a densidade aparente descontando-se o volume da porosidade interna do carvão vegetal.

A densidade verdadeira do carvão vegetal também sofre influência da temperatura de carbonização. A densidade verdadeira no carvão vegetal aumenta entre as temperaturas de 300 e 700 °C e mantém-se constante entre 800 e 900 °C. Este aumento é mais acentuado na faixa de 500 a 700 °C em função de um possível rearranjo dos átomos de carbono resultando em uma estrutura mais ordenada<sup>28</sup>. Discordando desta teoria WENZEL<sup>48</sup> afirma que a densidade verdadeira deve decrescer com o aumento da temperatura .

No entanto, OLIVEIRA et alii<sup>32</sup> sugerem que a densidade verdadeira também é influenciada pelo teor de carbono fixo, aumentando com a elevação do teor de carbono fixo.

### Porosidade :

O grau de porosidade indica a porcentagem em volume de poros em relação ao volume total. Este grau tem um papel importante nos carvões metalúrgicos. Madeiras que apresentam maior porosidade irão originar carvões com maior área de acesso as reações com o  $\text{CO}_2$ , havendo maior consumo de carbono no alto forno.

UHART<sup>44</sup> concorda com esta teoria afirmando que a porosidade do carvão explica o seu poder de absorção de gases. Alguns poderes absorventes de 1  $\text{cm}^3$  de carvão poderão ser visualizados na Quadro nº 13, elaborada pelo mesmo.

Quadro nº 13 - Poder de absorção de 1  $\text{cm}^3$  de carvão vegetal.

| Voláteis                        | Volume            |
|---------------------------------|-------------------|
| $\text{CO}_2$ (gás carbônico)   | 97 $\text{cm}^3$  |
| $\text{HCl}$ (ácido clorídrico) | 166 $\text{cm}^3$ |
| $\text{NH}_3$ (amoníaco)        | 178 $\text{cm}^3$ |

A porosidade do carvão vegetal exerce influência na sua friabilidade afirmam MENDES et alii<sup>28</sup> quando relatam que a resistência do carvão diminui, aumentando a probabilidade de formação de finos com o aumento da porosidade.

### Friabilidade :

A resistência a geração de finos é obtida através do teste de tamboramento que mede o grau de friabilidade do material su-

jeito ao manuseio e transporte. Permite a comparação entre carvões produzidos a partir de espécies diferentes e, também, carvões produzidos por diferentes processos de carbonização.

Apesar da utilização dos finos de carvão vegetal estar gradativamente introduzida na indústria cimenteira e na sinterização de minérios, carvões que apresentem baixo porcentual de finos são desejáveis para aplicações em siderurgia, pois os finos geram quedas de pressão nos reatores e podem fluidizar prejudicando a marcha do alto-forno, garantem OLIVEIRA & ALMEIDA<sup>25</sup>.

Normalmente a friabilidade do carvão vegetal é medida através de escalas de classificação. O Quadro nº 14 apresenta a escala que o Centre Technique Forestier Tropical utilizou para a análise da carbonização de espécies da Amazônia, transcrita por OLIVEIRA et alii<sup>26</sup>.

Quadro nº 14 - Escala de friabilidade do carvão vegetal.

| Friabilidade        | % abaixo de 20 mm |
|---------------------|-------------------|
| Muito friável       | > 30              |
| Bastante friável    | 25 - 29           |
| Friabilidade média  | 15 - 24           |
| Pouco friável       | 10 - 15           |
| Muito pouco friável | < 10              |

OLIVEIRA et alii<sup>26</sup> concluíram que a resistência do carvão à geração de finos depende, principalmente, da umidade, do diâmetro e comprimento da madeira a ser carbonizada. Estudos realizados por OLIVEIRA et alii<sup>27</sup>, carbonizando *Eucalyptus grandis* concluem que quanto maior o teor de umidade da madeira, maior será a geração de

finos. Teores de umidade mais elevados podem ocasionar a formação de trincas internas no carvão vegetal e, conseqüentemente, maior geração de finos. Este mesmo raciocínio pode ser seguido com relação ao diâmetro da madeira, pois madeiras com maiores diâmetros e com cerne já formado apresentam trincas devido ao gradiente de umidade entre cerne e alburno.

A friabilidade, também, é influenciada pela temperatura de carbonização. OLIVEIRA et alii<sup>22</sup> descrevem que a porcentagem de finos aumenta a 500 °C e diminui a 300 °C e a 700 °C. Esta queda da resistência a 500 °C é atribuída pelos mesmos autores a :

1. Aumento da porosidade interna, devido a extração de voláteis.
  2. Modificações no tamanho e distribuição dos poros com o efeito da temperatura.
  3. Maior extração, a 500 °C, de componentes tais como o alcatrão que mantem maior aderência das fibras do carvão.
  4. Tendência a grafitização do carvão vegetal em temperaturas superiores a 500 °C, com o aumento da resistência do carvão.
- MCGINNES<sup>24</sup> concorda com esta teoria quando afirma que após a madeira ser submetida a temperaturas de 400 a 1500 °F tem suas estruturas amorfa e cristalina transformadas em grafite.

#### 2.6.2. LÍQUIDO PIROLENHOSO

A composição quantitativa da solução pirolenhosa varia segundo a espécie vegetal destilada, a velocidade das reações e o processo de destilação empregado, segundo VEADO<sup>27</sup>.

O líquido pirolenhoso é constituído por duas frações, segundo HERMOSILLA, transcrito por REZENDE<sup>40</sup>:

#### 1. Ácido pirolenhoso:

- Ácidos voláteis: durante a destilação do ácido pirolenhoso, por arraste com vapor d'água, são obtidos na proporção de 10 a 12 % do peso inicial, 93 % de ácido acético, 3 % de ácido fórmico e 4 % de ácidos superiores.

- Metanol bruto: é obtido na proporção de 5 % a partir do ácido pirolenhoso e é composto, principalmente, de 65 % de metanol, 15 a 20 % de acetona, 10 % de acetado de metila, 1 a 2 % de álcoois superiores e 3 a 4 % de acetaldeído.

- Alcatrão solúvel: 5 % é separado com o resíduo final da destilação do ácido pirolenhoso. Entretanto, um ácido pirolenhoso sem alcatrão, volta a formá-lo, motivando o conceito da existência de produtos alcatranógenos. O alcatrão solúvel é constituído de alcatranógenos e óleos de alcatrão. STAMM & HARRIS<sup>49</sup> sugerem que o alcatrão solúvel pode ser separado do ácido pirolenhoso através da destilação efetuada em um simples evaporador.

- Água: solvente para os demais grupos, corresponde a 80 % do ácido pirolenhoso.

#### 2. Alcatrão insolúvel (A):

Separado do ácido pirolenhoso por decantação, um sempre estará misturado ao outro, saturando-se mutuamente. WENZEL<sup>40</sup> relata que o alcatrão insolúvel é uma fonte importante de fenóis, podendo ser separado em óleos de alcatrões leves e pesados e piche. Os óleos pesados dão origem ao creosoto.

O rendimento em ácido pirolenhoso decresce com o aumento da temperatura de carbonização, segundo ALMEIDA<sup>1</sup>. Contudo, AMY, transcrito por REZENDE<sup>2</sup>, relata que a taxa de produção de ácidos pirolenhosos passa por um índice máximo entre 250 e 300 °C e, cessa a 350 °C.

O rendimento e viscosidade do alcatrão aumentam com a elevação da temperatura de carbonização, segundo ALMEIDA<sup>1</sup> e decrescem com o aumento da velocidade de carbonização. Porém, de acordo com REZENDE<sup>2</sup>, o alcatrão é formado entre 300 e 450 °C.

Estudos realizados por OLIVEIRA et alii<sup>3</sup>, demonstram que o poder calorífico do alcatrão varia em função de sua umidade e composição química, que por sua vez depende da umidade da madeira, espécie vegetal e do próprio processo de carbonização. O teor de umidade do alcatrão depende do sistema de recuperação do mesmo.

Os dados apresentados no Quadro nº 15, foram obtidos pelos mesmos autores e mostram a variação do poder calorífico do alcatrão em função da sua umidade.

Quadro nº 15 - Poder calorífico do alcatrão em função da umidade.

| Poder calorífico superior<br>(Kcal/kg) | Teor de umidade<br>(%) |
|--|------------------------|
| 6240                                   | 4                      |
| 6183                                   | 10                     |
| 6075                                   | 18                     |
| 5418                                   | 25                     |
| 5521                                   | 31                     |
| 5365                                   | 38                     |

### 2.6.3. Gás não condensável (GNC)

O gás não condensável é um combustível gasoso, cuja composição varia bastante com o processo de carbonização, mas basicamente é constituído por  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{C}_n\text{H}_m$ , afirmam MATOS et alii<sup>25</sup>.

O rendimento em gás não condensável aumenta com a temperatura de carbonização. Até a temperatura de 280 °C ocorre grande produção de gases oxigenados. Após a temperatura de 500 °C a produção do gás hidrogênio intensifica-se, relata REZENDE<sup>40</sup>.



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. ESPÉCIES UTILIZADAS:

Para a realização do presente estudo optou-se por três espécies florestais da região semi-árida do Nordeste do Brasil que apresentam grande potencial de utilização como carvão vegetal e em razão, também, de sua disponibilidade na região:

1. *Leucaena leucocephala* Lam (leucena)
2. *Caesalpinia pyramidalis* Tul (catingueira)
3. *Aspidosperma pyrifolium* Mart (pereiro)

#### 3.2. LOCAL DE COLETA:

A espécie leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) foi proveniente de um projeto implantado pela UFPB, no ano de 1980, com espaçamento 3m x 3m no local denominado Várzea de Jurema - Patos. O material das essências catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) foi coletado em locais de sua ocorrência natural dentro do município de Patos, no Estado da Paraíba. O município, localizado no sertão paraibano, apresenta altitude de 250 m, precipitação média anual variando de 500 a 1000 mm, temperatura média anual de 21 a 28 °C e umidade relativa entre 60 a 70 %. A vegetação da área é formada

pela caatinga caracterizada por formações arbóreas e arbóreas-arbustivas. Os solos são rasos, pedregosos ou arenosos, de pH neutro ou próximo de 7,0, pobres em matéria orgânica, porém ricos em sais minerais solúveis, principalmente cálcio e potássio<sup>27</sup>.

### 3.3. AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DO MATERIAL:

Seguindo a metodologia utilizada por FARIA<sup>15</sup>, cortou-se, aleatoriamente, amostras de árvores que possuíam o diâmetro a 10 cm do nível do solo, superior a 5 cm. Devido ao fato das espécies utilizadas apresentarem muitas ramificações com diferentes diâmetros, a quantificação do material coletado foi baseado em valores de peso seco de matéria lenhosa de cada espécie utilizada. Coletou-se, em média, 80 kg de material para cada espécie. Para a obtenção desta quantidade de material foram abatidas 12 árvores de leucena (*Leucaena leucocephala* Lam), 6 árvores de catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e 7 árvores de pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart), formando três lotes, cada um correspondendo a uma espécie utilizada. Os fustes que formaram os lotes foram seccionados para formar corpos de prova com 30 cm de comprimento e diâmetro natural das peças. Estes corpos de prova, separados por espécie, foram submetidos à secagem natural à sombra, por um período de 60 dias.

### 3.4. PROPRIEDADES DA MADEIRA:

#### 3.4.1. Massa específica aparente da madeira

Foi determinada a massa específica aparente de cada espécie pelo fato da mesma estar correlacionada com a densidade aparente e o rendimento em peso do carvão.

Para a determinação da massa específica aparente, adotou-se a metodologia do CETEC que baseia-se na Norma ASTM-D-2395-69, método B-III.

Retirou-se, aleatoriamente, do lote de cada espécie cinco amostras, das quais foram retirados três discos com altura de 2,5 cm, medidos no sentido paralelo às fibras. Estes corpos de prova, num total de 15 por espécie, foram submetidos à secagem em estufa à temperatura de  $103 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , até atingirem peso constante. Após o resfriamento das amostras, realizado em dessecador, as mesmas foram pesadas e, em seguida, mergulhadas em solução de tetracloreto de carbono, saturada com parafina para evitar a absorção de umidade. Concluídas estas operações cada amostra foi colocada dentro de um cesto metálico, o qual estava conectado por um fio metálico a uma balança e, efetuava-se a submersão do cesto em água por um período de 60 s. Após a retirada do cesto de dentro da água, realizou-se a pesagem das amostras. O volume da madeira na água é a diferença entre o peso do cesto contendo a amostra (mergulhado na água) e o peso do cesto (mergulhado na água).

Calculou-se, então, a massa específica aparente da madeira pela fórmula:

$$M.E.A. = \frac{P_a}{P_{imp.} + P_{água}}, \text{ onde:}$$

M.E.A. = Massa específica aparente, em g/cm<sup>3</sup>.

P<sub>a</sub> = Peso da amostra seca em estufa, em g.

P<sub>imp.</sub> = Peso da amostra impermeabilizada, em g.

P<sub>água</sub> = Peso do cesto mergulhado na água - peso do cesto contendo madeira, mergulhado na água, em g.

#### 3.4.2. Teor de umidade da madeira

Com o objetivo de obter-se o maior controle possível sobre as condições operacionais, antes de cada carbonização eram retiradas dos lotes de cada espécie duas amostras, com 30 cm de comprimento e diâmetro natural da peça, para a determinação do teor de umidade da madeira a ser carbonizada. Estas amostras eram cortadas em seções de 2,0 cm e após desprezar-se as duas seções retiradas nos topos das peças, procedia-se a homogeneização destas amostras. Aleatoriamente, eram escolhidas 10 seções, as quais foram devidamente identificadas. Estas seções foram pesadas e levadas à estufa à temperatura de 103 °C ± 2 °C, até peso constante. Após a secagem e resfriamento do material, realizou-se, novamente a pesagem. De posse destes resultados o teor de umidade da madeira foi determinado com a aplicação da seguinte fórmula:

$$U = \frac{P_u - P_o}{P_o} \cdot 100, \text{ onde :}$$

U = Teor de umidade da madeira, em %.

P<sub>u</sub> = Peso da madeira úmida, em g.

P<sub>o</sub> = Peso da madeira seca em estufa a 103 °C ± 2 °C, até peso constante, em g.

### 3.4.3. Análise química dos constituintes da madeira

A análise química dos constituintes da madeira foi realizada no Laboratório de Química da Madeira do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná; utilizando-se cinco amostras de cada espécie retiradas, aleatoriamente, do lote destinado a carbonização. Estas amostras foram transformadas em serragem que atravessasse uma peneira de malha 40 mesh. Procedeu-se o acondicionamento da serragem em sacos plásticos e para a análise de cada constituinte químico da madeira foram realizadas três repetições por espécie utilizada.

Serão abordados rapidamente os processos utilizados em cada determinação, tendo em vista que as normas utilizadas descrevem detalhadamente cada operação e podem ser facilmente consultadas.

-Determinação do teor de celulose: Determinou-se através da Norma ABCP M9/71, que utiliza amostra de 0,5 g de serragem seca ao ar e um processo que consiste basicamente na aplicação de

vários reagentes, os quais irão degradar os outros constituintes químicos da madeira, restando como produto final somente a celulose..

-Determinação do teor de hemicelulose: Determinado de acordo com a Norma ABCP C8/70. Esta norma utiliza amostras de 1,0 g. e como reagente principal o ácido clorídrico a 12 %.

-Determinação do teor de lignina: Determinou-se através da Norma ABCP C7/71. O método utilizado para a determinação da lignina da serragem foi através do uso de ácido sulfúrico a 72 %, conforme prescreve a norma citada. Amostras de 1,0 g foram pesadas e submetidas à extrações preliminares com álcool etílico, álcool-benzeno, água quente e finalmente ácido sulfúrico a 72 %.

-Determinação da solubilidade da madeira em álcool-benzeno: Foi seguida a Norma M6/68 que utiliza amostras de 2,0 g e como reagente solução álcool-benzeno, com um volume de álcool etílico a 95 % misturado com dois volumes de benzeno.

-Determinação do teor de cinzas: Utilizou-se a Norma ABCP P3/70 que consiste basicamente em levar à mufla 5.0 g de serragem à temperatura de 600 °C, durante um período de 6 horas.

-Determinação do teor de umidade : Determinou-se através da Norma ABCP M2/71 que utiliza amostras de 1.0 g de serragem úmida, a qual é levada à estufa à temperatura de 105 °C  $\pm$  2 °C até peso constante. O teor de umidade é obtido relacionando-se o peso seco com o peso úmido da serragem.

### 3.5. CARBONIZAÇÃO

As carbonizações, bem como, a determinação dos rendimentos e das propriedades físicas e químicas dos produtos das carbonizações foram realizadas no Centro de Carvão Vegetal da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC.

As três espécies foram carbonizadas em retorta elétrica com as seguintes características:

Capacidade do cadinho: 12 a 19 kg de madeira.

Diâmetro do cadinho: 30 cm.

Altura do cadinho: 64 cm.

Material do cadinho: aço AISI 310, chapa de 8 mm.

Forno: resistências Kanthal, 22 kva de potência.

Temperatura máxima de 1000°C com programador de temperatura para até 360h de teste.

Recuperação dos condensados através de sistema com resfriamento à água.

A temperatura de carbonização foi controlada através de dois termopares localizados no centro e em uma das laterais do cadinho.

A Figura nº 03 mostra o esquema da montagem dos equipamentos utilizados nas operações de carbonização

A taxa de aquecimento utilizada foi de 0,625 °C/min. e temperaturas finais de carbonização de 350, 450, 550 e 750 °C, por representarem as faixas onde ocorre a maior porcentagem de liberação de sub-produtos do carvão vegetal.

As operações de carbonização procederam-se na seguinte sequência: Após a pesagem dos cadinhos vazios, os mesmos eram

preenchidos com as amostras de madeira retiradas aleatoriamente dos lotes e, novamente, eram pesados. Os cadinhos eram colocados no interior da retorta e iniciava-se o processo de carbonização. Durante as carbonizações os produtos voláteis foram recuperados através de um sistema de condensadores e os gases não condensáveis lançados na atmosfera.

Concluída a carbonização, o carvão vegetal produzido foi resfriado dentro do cadinho até atingir temperaturas próximas a 40 °C.

Após o resfriamento o carvão foi acondicionado em sacos plásticos com o objetivo de evitar a absorção de umidade da atmosfera.



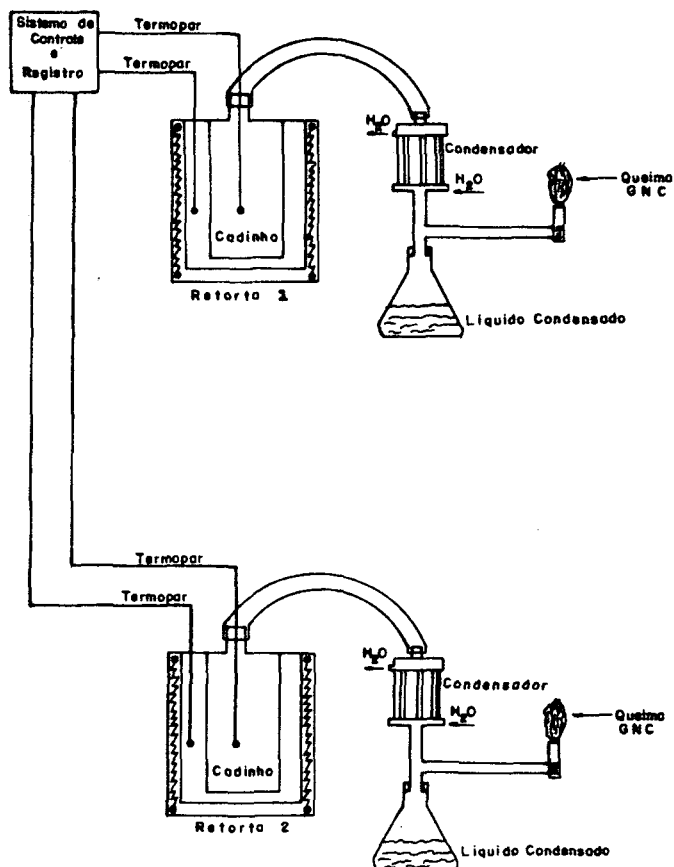


Figura nº. 03 - Esquema do sistema de carbonização utilizado.

### 3.6. RENDIMENTOS DOS PRODUTOS DA CARBONIZAÇÃO

Devido à escassez do material foram realizadas duas repetições de carbonização para cada espécie e cada temperatura utilizada, totalizando 24 operações de carbonização.

Foram avaliados os rendimentos em peso do carvão vegetal, líquido condensado, gás não condensável e alcatrão insolúvel.

### 3.6.1. Rendimento em peso do carvão vegetal

Após a conclusão das operações de carbonização, resfriamento do forno e acondicionamento do carvão obtido como resíduo da carbonização, efetuou-se a pesagem do material carbonizado e, novamente, realizou-se o acondicionamento e identificação do carvão vegetal em sacos plásticos para a posterior avaliação das suas propriedades químicas e físicas.

Para a avaliação do rendimento do carvão vegetal foi utilizada a seguinte fórmula:

$$Rcv = \frac{Pcv}{Pms} \cdot 100, \text{ onde:}$$

Rcv = Rendimento do carvão vegetal em base seca, em %.

Pcv = Peso do carvão vegetal, em g.

Pms = Peso da madeira seca em estufa a  $103 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
até peso constante, em g.

### 3.6.2. Rendimento em peso do líquido condensado

O líquido condensado foi coletado em balão volumétrico com capacidade para 12 l. Após a pesagem do material coletado, o mesmo foi transferido para um decantador onde permaneceu por um período

de aproximadamente 24 horas. Após a decantação do alcatrao insolúvel, retirou-se o mesmo através de uma torneira localizada na base do decantador e procedeu-se a pesagem do material. O líquido pirolenhoso, isento de alcatrao insolúvel, foi novamente pesado. Concluída a coleta dos dados, realizou-se o cálculo do rendimento em peso do líquido condensado através da seguinte fórmula:

$$Rlp = \frac{Pl - [Pmv \cdot U]}{100}$$

Rlp = -----, onde:

$$Pmv = \frac{100 - U}{100}$$

Rlp = Rendimento do líquido pirolenhoso em base seca,  
em %

Plp = Peso do líquido condensado - peso do alcatrao  
insolúvel, em g.

Pmu = Peso da madeira úmida enforada, em g.

U = Teor de umidade da madeira, em %.

### 3.6.3. Rendimento em peso dos gases não condensáveis

Os gases não condensáveis foram lançados na atmosfera, portanto, sua avaliação foi realizada por diferença através da fórmula:

$R_{gnc} = 1 - (R_{cv} + R_l + R_{ai})$ , onde:

$R_{gnc}$  = Rendimento em gases não condensáveis, em %.

$R_{cv}$  = Rendimento em carvão vegetal em base seca, em %.

$R_l$  = Rendimento do líquido pirolenhoso em base seca, em %.

$R_{ai}$  = Rendimento do alcatrão insolúvel em base seca, em %.

#### 3.6.4. Rendimento em peso do alcatrão insolúvel

O alcatrão insolúvel, obtido por decantação, conforme foi descrito no item 3.6.2., foi determinado utilizando-se da fórmula abaixo:

$R_{ai} = \frac{P_{ai}}{P_m \cdot (100 - U)}$ , onde:

$P_m$  =  $\frac{(100 - U)}{100}$

100

$R_{ai}$  = Rendimento em peso do alcatrão insolúvel, em base seca, em %.

$P_{ai}$  = Peso do alcatrão, em g.

$P_m$  = Peso da madeira, em g.

$U$  = Teor de umidade da madeira, em %.

### 3.7. PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL

As características físico-químicas do carvão vegetal podem apresentar uma grande variedade de propriedades, as quais irão determinar a sua utilização mais adequada.

#### 3.7.1. Amostragem

O carvão proveniente das duas repetições de cada tratamento aplicado foi homogeneizado e a amostragem do material foi realizada segundo a Norma NBR 6923. O fluxograma da sequência seguida na separação das amostras pode ser observado na Figura nº 04.

#### 3.7.2. Composição química elementar do carvão vegetal

A composição química elementar do carvão vegetal foi determinada, pelo Laboratório de Química do CETEC, através do Analisador Elementar CHN, marca Perkin-Elmer, modelo 240. Foi realizada apenas uma determinação para cada espécie e temperatura utilizadas devido a escassez do material coletado.

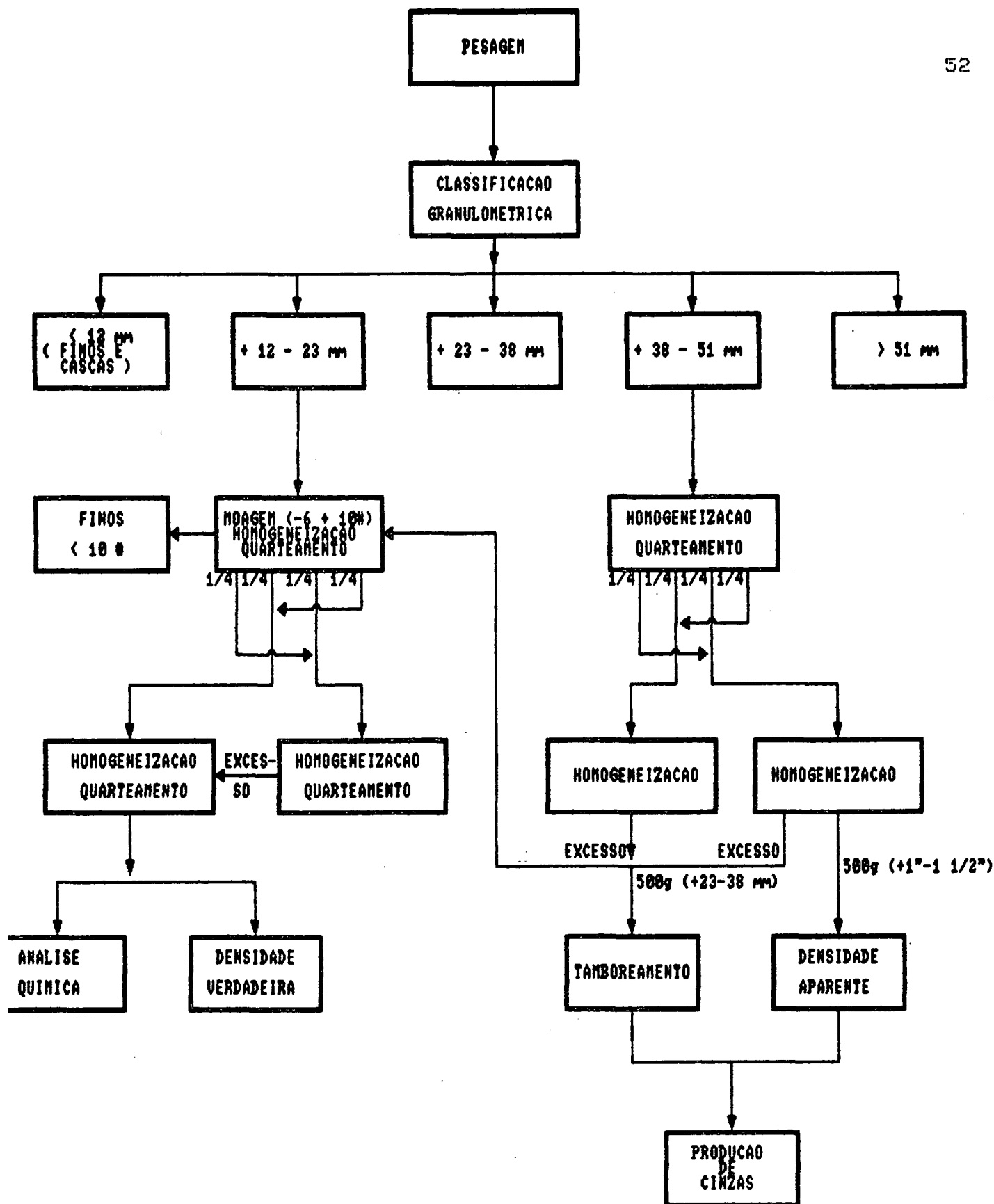


Figura nº 04 - Fluxograma de amostragem

### 3.7.3. Análise imediata

A análise imediata foi realizada de acordo com a Norma ABNT NBR 8112, que utiliza amostras de 1,0 g de carvão vegetal, isentas de umidade e de granulometria entre 0,210 mm e 0,150 mm, e determina os seguintes índices em porcentagem:

- Teor de matérias voláteis:

As amostras foram colocadas em cadinhos com tampa, e estes, levados à porta da mufla, previamente aquecida à  $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante 3 min.. Após este período de tempo, os cadinhos foram colocados no interior da mufla, sendo deixados por um tempo de 7 min. com a porta fechada. Finalmente, a amostra foi retirada, pesada e calculou-se o teor de matérias voláteis através da fórmula:

$$MV = \frac{P_1 - P_2}{P} \cdot 100 \quad , \text{ onde:}$$

MV = Teor de matérias voláteis, em %.

P1 = Massa inicial do cadinho + amostra, em g.

P2 = Massa final do cadinho + amostra, em g.

P = Massa da amostra, em g.

- Teor de cinzas:

Para a determinação do teor de cinzas colocou-se as amostras em cadinhos sem tampa, os quais foram levados à mufla aquecida à  $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , até a completa queima do material. Em seguida, realizou-se nova pesagem e o cálculo do teor de cinzas através da fórmula:

$$\text{CZ} = \frac{P_1 - P_0}{P} \cdot 100, \text{ onde:}$$

CZ = Teor de cinzas, em %.

P<sub>1</sub> = Massa do cadinho + resíduo, em g.

P<sub>0</sub> = Massa do cadinho, em g.

P = Massa da amostra, em g.

- Teor de carbono fixo:

O teor de carbono fixo foi calculado pela equação:

$$\text{CF} = 100 - (\text{CZ} + \text{MV}), \text{ onde:}$$

CF = Teor de carbono fixo, em %.

CZ = Teor de cinzas, em %.

MV = Teor de matérias voláteis, em %.

Em cada determinação foram realizadas três repetições para cada tratamento aplicado, totalizando 36 análises.



### 3.7.4. Análise das cinzas

A composição química das cinzas foi determinada, pelo Laboratório de Química do CETEC, através dos métodos gravimétrico-via úmida e por volumetria. Foi realizada apenas uma amostra para cada espécie retirada, aleatoriamente, do material oriundo das carbonizações realizadas nas quatro temperaturas utilizadas.

Método gravimétrico: Consiste, basicamente, em separar o constituinte desejado sob a forma de combinações definidas. Quando a análise é realizada por via úmida, a amostra é dissolvida e adiciona-se um reativo, de natureza orgânica ou inorgânica, o qual provoca a formação de um precipitado que é separado por filtração, levado em estufa, calcinado em mufla e, finalmente, pesado. Procede-se, então, os cálculos baseados no peso inicial da amostra e o peso final após a calcinação.

Foram determinados por gravimetria via úmida:

$Al_2O_3$  = Utiliza como reagentes hidróxido de sódio (NaOH) a 20 % e ácido clorídrico (HCl) 1:1.

$SiO_2$  = Ácidos utilizados : ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ) e ácido fluorídrico (HF).

MgO = Soluções utilizadas na determinação: fosfato ácido di-amônio  $(NH_4)_2HPO_4$  e hidróxido de amônio  $(NH_4OH)$ .

S = Provoca a precipitação com o cloreto de bário ( $BaCl_2$ ) e acidifica-se com ácido clorídrico (HCl).

Método volumétrico: Consiste em determinar a quantidade de substância pura contida em certa massa de substância bruta pesada

e dissolvida num volume dado, por meio de outra substância de concentração conhecida capaz de reagir com a primeira. O volume da solução reagente de título conhecido usada na reação determinam a massa do soluto desejado. O final de uma reação é dada por um indicador colorido.

Através da volumetria determinou-se:

CaO = Utilizou-se o ácido etileno diamino tetracético (E.D.T.A.), como solução reagente de concentração conhecida.

P = Determinado através da alcalinimetria que baseia-se na neutralização de solução alcalina através de uma solução ácida. O volume da solução ácida titulada permite calcular a massa da base ou título da solução alcalina.

### 3.7.5. Rendimento em carbono fixo

Baseado nos dados obtidos anteriormente o rendimento em carbono fixo foi determinado através da fórmula abaixo:

$$R_{cf} = R_c \cdot \frac{\% C.F.}{100}, \text{ onde:}$$

$R_{cf}$  = Rendimento em carbono fixo, em %.

$R_c$  = Rendimento em carvão vegetal, base seca, em %.

$\%CF$  = Teor porcentual de carbono fixo, base úmida, em %.

### 3.7.6. Poder calorífico superior

O poder calorífico superior do carvão vegetal foi determinado em bomba calorimétrica através da Norma ABNT NBR 8633, que baseia-se na queima de uma amostra de uma grama de carvão vegetal em uma bomba metálica, contendo oxigênio e submersa em um determinado volume de água. Todo o conjunto deve ser mantido em uma câmara térmicamente isolada. O número de unidades de calor liberadas é calculada pela exata observação da elevação da temperatura, resultante da combustão.

### 3.7.7. Propriedades físicas do carvão vegetal

As propriedades físicas do carvão vegetal foram determinadas em termos de densidades aparente e verdadeira, porosidade e friabilidade.

Para as análises das densidades aparente e verdadeira foi utilizada a metodologia desenvolvida pelo CETEC que baseia-se na Norma ASTM D-167-73.

Densidade aparente:

Para a realização da determinação da densidade aparente do carvão vegetal foi realizada a seguinte sequência de operações: Após a realização da amostragem e quarteamento, conforme o fluxograma de amostragem, o carvão foi secado em estufa à temperatura

de  $103 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  durante o período de duas horas. Concluído o resfriamento, o carvão era pesado e colocado dentro de um cesto de arame com tampa e imerso em um galão contendo água durante 15 minutos. A água deslocada era recolhida e pesada. Em seguida, pesava-se o carvão úmido e passava-se ao cálculo da densidade aparente através da fórmula:

$$D.A. = \frac{Pcs}{Pad - (Pcm - Pcs)}$$

D.A. = Densidade aparente do carvão vegetal, em  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Pcs = Peso do carvão após secagem em estufa, em g.

Pad = Peso da água deslocada do galão pelo cesto carvão, em g.

Pcm = Peso do carvão molhado, em g.

Densidade verdadeira:

O método utilizado para a determinação da densidade verdadeira consistiu em retirar amostras do carvão vegetal, proceder a moagem reduzindo o material a granulometria de  $0,2 \text{ mm}$  e, posteriormente a secagem durante duas horas em estufa à temperatura de  $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Iniciando o procedimento, pesou-se um picnômetro com água destilada até o nível de referência. Em seguida retirou-se a água e colocou-se em seu interior  $10 \text{ g}$  de carvão moído e seco e, novamente, pesou-se o conjunto. Foi efetuada a adição de água

destilada e levou-se à fervura. Após o resfriamento, efetuou-se a adição de mais água destilada até o nível de referência e pesou-se o conjunto.

Concluídas estas operações foram realizados os seguintes cálculos:

$$D.V. = \frac{P_c}{P_c - (P' - P'')}$$

D.V. = Densidade verdadeira, em g/cm<sup>3</sup>.

P<sub>c</sub> = Peso do carvão seco, em g.

P' = Peso do picnômetro àgua carvão, em g.

P'' = Peso do picnômetro água, em g.

Porosidade:

A porosidade foi obtida pela relação entre as densidades aparente e verdadeira, conforme é demonstrado a seguir:

$$P = 100 - 100 \cdot \left( \frac{DA}{DV} \right), \text{ onde:}$$

P = Porosidade do carvão vegetal, em %.

DA = Densidade aparente, em g/cm<sup>3</sup>.

DV = Densidade verdadeira, em g/cm<sup>3</sup>.

### Friabilidade:

A determinação do percentual de finos abaixo de 12 mm, que determina a friabilidade de carvão vegetal, foi realizada através do teste de tamboramento, segundo a Norma ABNT NBR 8740.

Foram realizadas três repetições para cada tratamento aplicado.

O método consistiu em tomar amostras de carvão vegetal com granulometria entre 32 e 38 mm e colocar estas amostras, individualmente, em um tambor rotativo, que gira a uma velocidade de 25 rpm, até atingir 150 voltas. Concluídas estas operações o carvão foi classificado granulométricamente, pesando-se o percentual que ficou retido abaixo da malha de 12 mm.

### 3.8. ALCATRÃO INSOLÚVEL

Devido à escassez de material coletado, foi realizada apenas uma determinação para a densidade e uma determinação para a umidade.

#### 3.8.1. Densidade:

A densidade a 20 °C do alcatrão insolúvel foi determinada diretamente em densímetro digital.

### 3.8.2. Teor de umidade:

Para a determinação do teor de umidade foi utilizado o método de placas desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC para a determinação de umidade em sabão, detergente e similares, com secagem, até peso constante, à temperatura de 105 °C.

### 3.9. DELINEAMENTO ESTATÍSTICO

Com o objetivo de verificar a influência das espécies e temperaturas de carbonização utilizadas, bem como as suas interações nas avaliações das propriedades e rendimentos dos produtos da carbonização que constam neste trabalho, realizou-se o delineamento estatístico.

Foi utilizado o delineamento estatístico completamente ao acaso com tratamentos fatoriais. Utilizou-se três espécies e quatro temperaturas de carbonização totalizando doze tratamentos.

As repetições de cada tratamento variaram de acordo com a disponibilidade do material carbonizado.

Considerou-se o modelo aditivo com as seguintes características: observações independentes com distribuição normal e mesma variância. Para satisfazer estas exigências foram aplica-

dos para cada variável três testes de aderência à análise de variância, ao nível de 5% de probabilidade:

1. Teste dos Chorrilhos: testar a independência das observações e dos erros.
2. Teste de Lilliefors: testar a normalidade da curva
3. Teste de Bartlett: testar a homocedasticidade

Algumas variáveis sofreram transformações com o objetivo de ajustar os dados à curva normal.

O Quadro nº 16 apresenta a análise de variância para tratamentos com três repetições.

Quadro nº 16 - ANOVA para tratamentos com três repetições

| -----             | -----          | ----- | ----- | ----- |
|-------------------|----------------|-------|-------|-------|
| -----             | -----          | ----- | ----- | ----- |
| FONTE DE VARIACÃO | G.L.           | S.Q.  | Q.M.  | F.*   |
| -----             | -----          | ----- | ----- | ----- |
| Temperatura (T)   | (T-1)= 03      |       |       |       |
| Espécie (E)       | (E-1)= 02      |       |       |       |
| Interação (E.T)   | (T-1)(E-1)= 06 |       |       |       |
| (Tratamento)      | (t-1)= 11      |       |       |       |
| Resíduo           | t(r-1)= 24     |       |       |       |
| -----             | -----          | ----- | ----- | ----- |
| TOTAL             | (tr-1)= 35     |       |       |       |
| -----             | -----          | ----- | ----- | ----- |

\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

O Quadro nº 17 demonstra a análise de variância para os tratamentos com duas repetições.

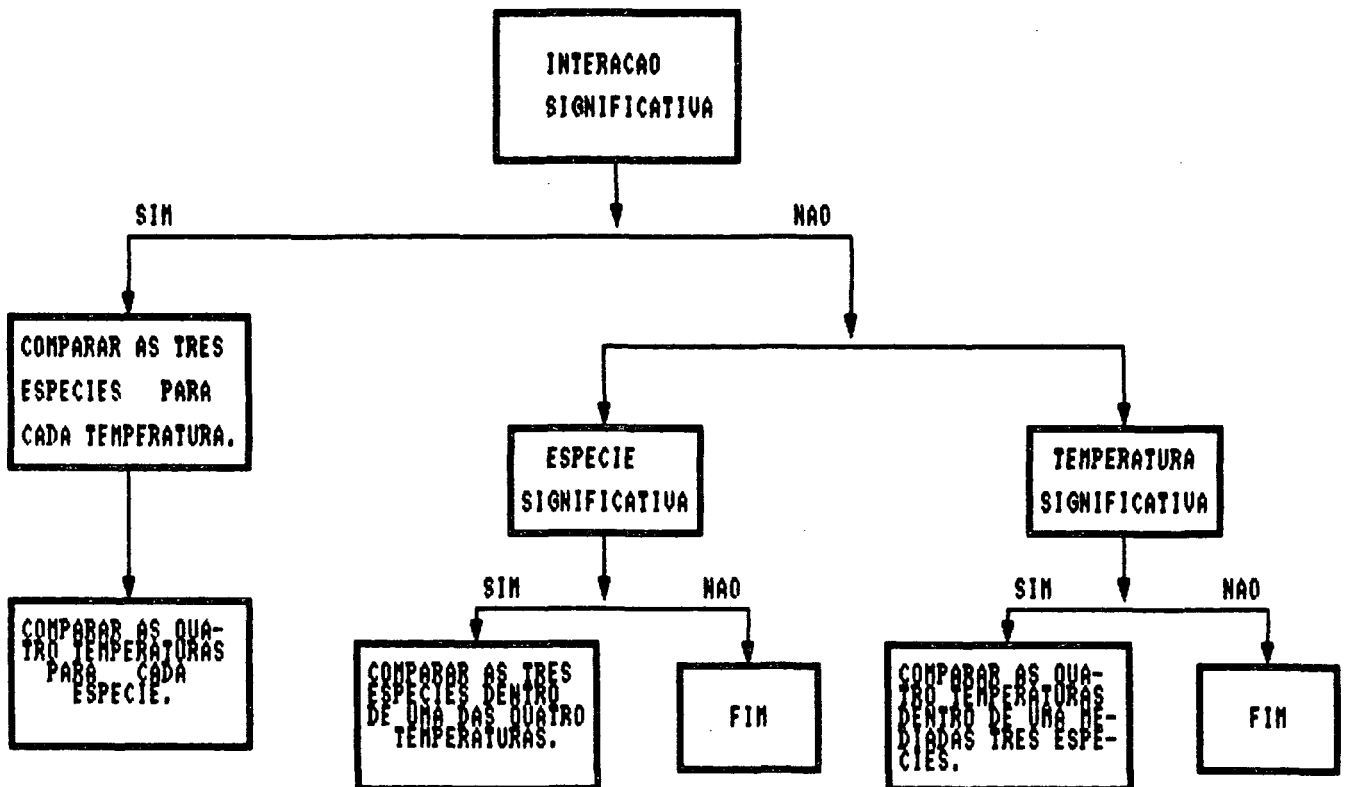


Quadro nº 17 \_ ANOVA para tratamentos com duas repetições

| FONTE DE VARIAÇÃO               | G.L.              | S.Q. | Q.M. | F.* |
|---------------------------------|-------------------|------|------|-----|
| Temperatura (T)                 | $(T-1) = 03$      |      |      |     |
| Espécie (E)                     | $(E-1) = 02$      |      |      |     |
| Interação (E.T)<br>(Tratamento) | $(T-1)(E-1) = 06$ |      |      |     |
| Resíduo                         | $t(r-1) = 12$     |      |      |     |
| Total                           | $(tr-1) = 23$     |      |      |     |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade

Para a comparação de médias foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, obedecendo-se os seguintes critérios em relação ao teste de "F":



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA MADEIRA

As médias obtidas para os resultados de massa específica aparente, bem como os respectivos teores de umidade das três espécies estão expostos no Quadro nº 18.

Quadro nº 18 - Massa específica aparente e teor de umidade das espécies estudadas

| Espécie     | Massa espec. aparente<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | C.V.<br>% | Teor de umidade<br>% | C.V.<br>% |
|-------------|---|-----------|----------------------|-----------|
| Leucena     | 0.69  | 11.80     | 10.70                | 16.77     |
| Catingueira | 0.82  | 3.07      | 12.81                | 10.91     |
| Pereiro     | 0.70  | 3.91      | 12.79                | 7.67      |

Os resultados obtidos de massa específica aparente estão de acordo com o esperado: a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam); uma espécie exótica de rápido crescimento, foi a essência que apresentou a menor massa específica aparente. Por outro lado, a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) que apresentou o maior percentual de cerne e, também, o maior teor de extrativos entre as três essências estudadas, conforme pode-se observar no Quadro nº 18, foi a espécie que apresentou madeira com maior massa específica aparente.

A espécie leucena apresentou massa específica aparente superior ao valor de 0,54 g/cm<sup>3</sup> encontrado pela NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE<sup>29</sup> em pesquisas realizadas com a espécie na mesma faixa de idade da madeira utilizada neste trabalho. Os resultados de massa específica aparente das madeiras de catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e pereiro (*Aspidosperma pyriforme* Mart) estão de acordo com os obtidos por PAULA<sup>37</sup> quando analisou estas espécies.

Os dados obtidos para as três espécies encontram-se dentro da média dos resultados encontrados por OLIVEIRA et alii<sup>32</sup>, quando estudaram várias espécies de *Eucalyptus* destinadas a carbonização.

#### 4.2 ANÁLISE QUÍMICA DOS CONSTITUINTES DAS ESPÉCIES ESTUDADAS

Devido à escassez de dados na literatura, procurou-se determinar a análise química dos constituintes das espécies estudadas e correlacionar os teores de cada constituinte com as propriedades do carvão vegetal.

O Quadro nº 19 mostra a análise química dos constituintes das madeiras testadas.

Quadro nº 19 - Análise química da serragem da madeira das três espécies utilizadas.

| Espécie | Umidade<br>% | Celulose<br>% | Hemicelulose<br>% | Lignina<br>% | Extrativos<br>% | Cinzas<br>% |
|---------|--------------|---------------|-------------------|--------------|-----------------|-------------|
| Leucena | 4.52         | 57.94         | 20.58             | 24.72        | 3.56            | 0.86        |
| C.V. %  | 0.02         | 4.81          | 8.18              | 1.53         | 0.61            | 1.18        |
| Cating. | 7.80         | 52.30         | 22.37             | 20.68        | 8.37            | 2.11        |
| C.V. %  | 0.01         | 6.10          | 0.26              | 3.58         | 0.09            | 0.06        |
| Pereiro | 8.67         | 54.91         | 22.70             | 23.62        | 5.00            | 0.61        |
| C.V. %  | 0.03         | 26.64         | 12.53             | 1.43         | 0.27            | 0.00        |

Os resultados encontrados pela NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE<sup>29</sup> para a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) com 18 meses de idade, são relativamente semelhantes, porém apresentam um teor de celulose superior ao encontrado neste trabalho. Deve-se, porém, levar em consideração que as madeiras apresentavam idades diferentes.

Os dados obtidos com a análise química dos constituintes das espécies estudadas apresentam-se dentro da média citada pela literatura para *Eucalyptus* spp, exceto o teor de cinzas que apresentou-se superior ao teor encontrado para o gênero *Eucalyptus*. Não foi possível estabelecer uma correlação completa entre os dados obtidos e os rendimentos dos produtos da carbonização, bem como, com a análise química imediata do carvão nas condições nas quais as três espécies foram carbonizadas, como será visto posteriormente. Porém, nota-se que as espécies leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) e pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) apresentaram resultados semelhantes, provavelmente pela pouca variação entre os resultados de massa específica aparente obtidos para estas duas espécies.

#### 4.3 RENDIMENTOS DOS PRODUTOS OBTIDOS NA CARBONIZAÇÃO

Os produtos obtidos na carbonização das três espécies foram avaliados através de seus rendimentos gravimétricos, tomados em base seca.

##### 4.3.1. Rendimento em carvão

O Quadro nº 20 apresenta a média dos rendimentos em peso, tomados em base seca, do carvão vegetal resultante da carbonização das três espécies estudadas em função da temperatura de carbonização, bem como seus respectivos coeficientes de variação.

Quadro nº 20 - Rendimento em peso do carvão vegetal das três espécies estudadas em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Rendimento em carvão vegetal |           |             |           |         |           |
|--------------------|------------------------------|-----------|-------------|-----------|---------|-----------|
|                    | Leucena                      |           | Catingueira |           | Pereiro |           |
|                    | %                            | C.V.<br>% | %           | C.V.<br>% | %       | C.V.<br>% |
| 350                | 40.08                        | 2.85      | 42.42       | 0.08      | 38.33   | 3.43      |
| 450                | 35.91                        | 3.54      | 39.79       | 5.00      | 34.99   | 1.07      |
| 550                | 32.86                        | 2.75      | 37.03       | 0.44      | 32.99   | 1.01      |
| 750                | 30.65                        | 2.54      | 33.18       | 0.36      | 29.57   | 0.60      |

Pode-se observar no Quadro nº 20 e, também, na Figura nº 05 que ocorre uma redução do rendimento em carvão com o aumento da

temperatura de carbonização para as três espécies estudadas, sendo esta redução mais acentuada nas temperaturas mais baixas. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por OLIVEIRA et alii<sup>24</sup>, ALMEIDA<sup>21</sup>, FARIA<sup>15</sup> e BARBOSA<sup>24</sup>; que atribuem o fato ao aumento da temperatura provocar a dissociação do carvão, ocorrendo a perda de massa a partir de 300 °C.

Apesar de ocorrer uma diminuição no percentual de variação dos rendimentos com a elevação da temperatura de carbonização não observou-se a tendência a estabilização desta variação constatada por ALMEIDA<sup>21</sup>. Este fato está de acordo com FARIA<sup>15</sup> que também carbonizou uma espécie ocorrente na região semi-árida: a jurema preta (*Mimosa hostilis* Benth).

Os dados obtidos para as três espécies apresentam-se levemente superiores aos encontrados por BARBOSA<sup>24</sup> que carbonizou uma espécie exótica de rápido crescimento, introduzida no Nordeste: a algaroba (*Prosopis juliflora* D.C.), porém inferiores aos resultados apresentados por FARIA<sup>15</sup> com a espécie jurema preta.

Nota-se, ainda, uma tendência dos resultados dos rendimentos das três espécies em corresponder aos resultados obtidos com o gênero *Eucalyptus*, relatados por OLIVEIRA et alii<sup>24</sup> e COUTINHO<sup>11</sup>.

Nas condições em que foram carbonizadas a espécie catin-gueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) apresentou os valores mais elevados de rendimento em carvão e a madeira de pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) os menores rendimentos.

O Quadro nº 21 apresenta a ANOVA do rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Quadro nº 21 - Análise de variância do rendimento em carvão vegetal

| FONTE DE VARIACÃO | G.L. | S.Q.     | Q.M.     | F         |
|-------------------|------|----------|----------|-----------|
| Temperatura       | 3    | 299.6055 | 99.8685  | 105.5188* |
| Espécie           | 2    | 42.6660  | 21.3330  | 22.5400*  |
| Interação(E.T)    | 6    | 13.9004  | 2.3167   | 2.4478ns  |
| (Tratamento)      | 11   | 356.1719 | 123.5182 | 130.5066* |
| Resíduo           | 12   | 11.3574  | 0.9465   |           |
| TOTAL             | 23   | 367.5293 | 124.4646 |           |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

ns Não significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

O Quadro nº 21 mostra que as espécies, as temperaturas e os tratamentos exercem efeito significativo no rendimento em carvão vegetal ao nível de 5 % de probabilidade. As interações entre as espécies e as temperaturas não são significativas ao nível de 5 % de probabilidade.

A Figura nº 05 ilustra o comportamento do rendimento em carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

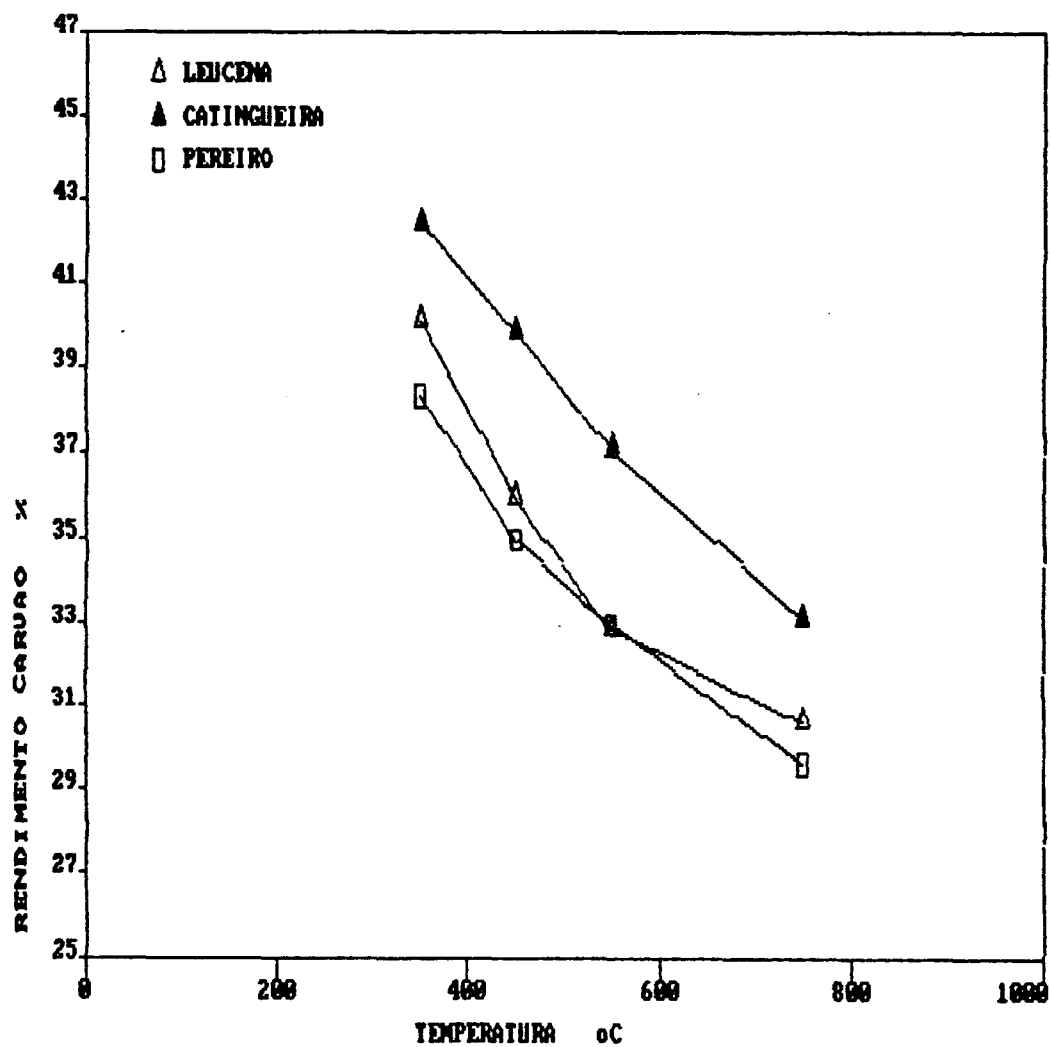


Figura nº 05 - Rendimento em carvão vegetal em função da temperatura de carbonização



Pode-se observar no Quadro nº 22 a comparação entre os rendimentos em carvão vegetal obtidos em função da temperatura de carbonização.

Quadro nº 22 - Quadro comparativo de médias. Rendimento em carvão vegetal

| TEMPERATURAS<br>°C | ESPÉCIES     |                  |              | Médias<br>% |
|--------------------|--------------|------------------|--------------|-------------|
|                    | Leucena<br>% | Catingueira<br>% | Pereiro<br>% |             |
| 350                | 40.08        | 42.42            | 38.33        | 40.28 a     |
| 450                | 35.91        | 39.79            | 34.99        | 36.90 b     |
| 550                | 32.86        | 37.03            | 32.99        | 33.01 c     |
| 750                | 30.65        | 33.18            | 29.57        | 31.13 d     |
| Médias             | 34.88<br>A   | 37.14<br>B       | 33.97<br>A   |             |

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

A espécie catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) apresentou os maiores rendimentos em carvão em uma média das quatro temperaturas de carbonização. Não houve variação significativa nos rendimentos em carvão vegetal entre a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) e o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart). Esta ocorrência pode ser explicada pelo fato destas duas espécies apresentarem massa específica aparente e composição química semelhantes. Todas as espécies testadas apresentaram variação

significativa nos rendimentos em carvão com a elevação da temperatura de carbonização.

#### 4.3.2. Rendimento em líquido pirolenhoso

Os resultados de rendimento em líquido pirolenhoso obtidos com a carbonização das espécies utilizadas estão apresentados no Quadro nº 23.

Quadro nº 23 - Rendimento em peso do líquido pirolenhoso, tomado em base seca, das três espécies utilizadas em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Rendimento em líquido pirolenhoso |      |                  |      |              |      |
|--------------------|-----------------------------------|------|------------------|------|--------------|------|
|                    | Leucena C.V.                      |      | Catingueira C.V. |      | Pereiro C.V. |      |
|                    | %                                 | %    | %                | %    | %            | %    |
| 350                | 36.65                             | 3.01 | 33.58            | 0.13 | 30.36        | 9.46 |
| 450                | 33.42                             | 5.59 | 34.83            | 3.07 | 33.89        | 2.00 |
| 550                | 33.46                             | 7.31 | 31.12            | 0.39 | 34.81        | 2.03 |
| 750                | 34.51                             | 3.09 | 32.91            | 0.43 | 34.44        | 3.74 |

A Figura nº 06, que ilustra os dados apresentados no Quadro nº 23, mostra que os rendimentos em líquido pirolenhoso aumentam com a elevação da temperatura de carbonização até a temperatura de aproximadamente 400 °C para as três espécies. Após esta temperatura os rendimentos para a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) e para o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) apresentaram uma

tendência a estabilização e o rendimento para a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) sofreu um brusco decréscimo, provavelmente devido a alguma falha não detectável, possivelmente um vazamento, ocorrida durante as carbonizações. Porém, ao verificar-se a análise estatística constata-se que a temperatura de carbonização não produz efeito significativo, ao nível de 5 % de probabilidade, no rendimento em líquido pirolenhoso das três espécies estudadas, concluindo-se, então, que a variação mostrada na Figura nº 06 não é significativa.

No entanto, OLIVEIRA et alii<sup>24</sup> afirmam que quanto maior a temperatura de carbonização, maior será o grau de destilação da madeira, tendo como consequência o aumento do rendimento em líquido condensável. Esta afirmação está de acordo com os dados obtidos com a madeira de jurema-preta apresentados por FARIA<sup>15</sup>, porém discorda com os resultados encontrados por ALMEIDA<sup>21</sup> e BARBOSA<sup>24</sup> que sugerem um decréscimo no rendimento do líquido pirolenhoso com a elevação da temperatura de carbonização, quando carbonizaram *Eucalyptus grandis* e *Prosopis juliflora*, respectivamente.

O comportamento dos rendimentos em líquido pirolenhoso em função da temperatura de carbonização pode ser observado na Figura nº 06.

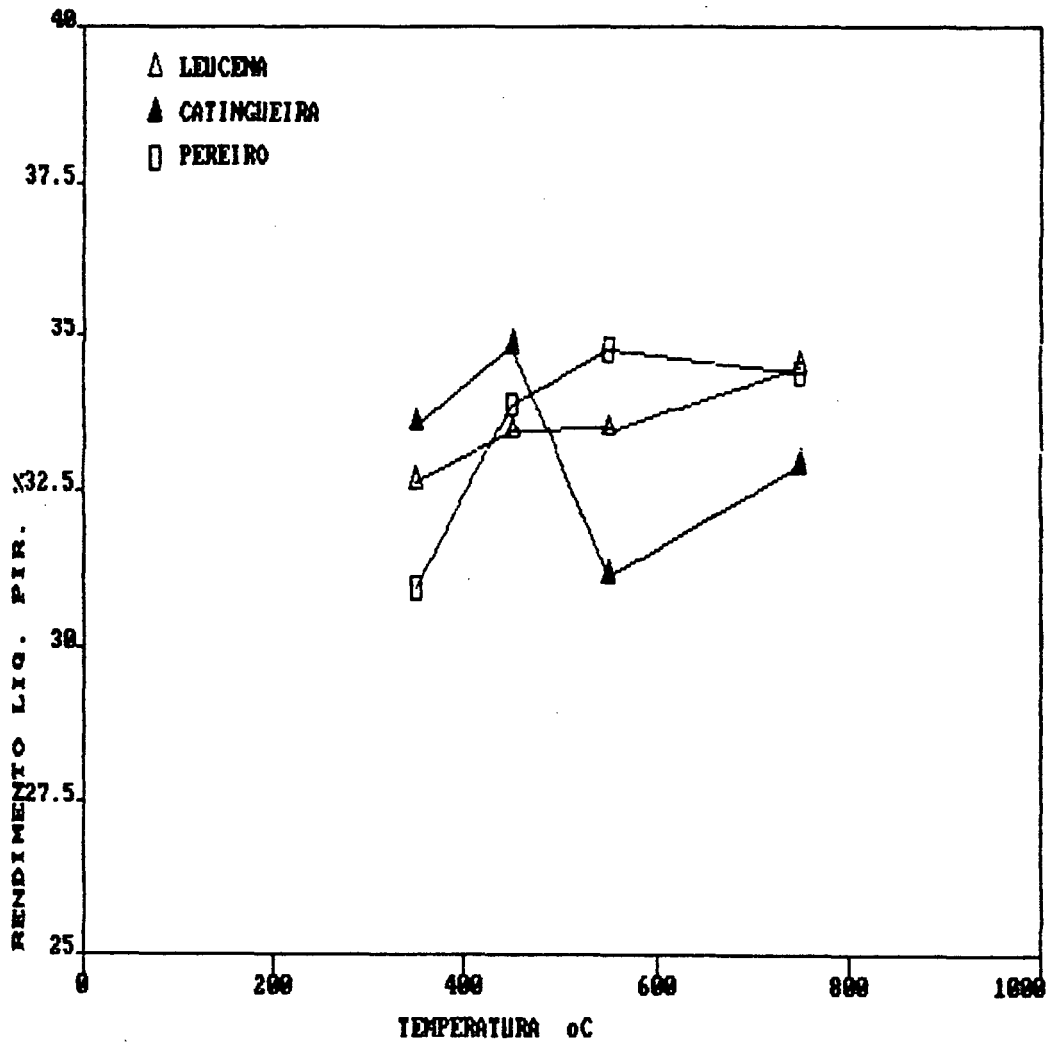


Figura nº 06 - Rendimento em líquido pirolenhoso em função da temperatura de carbonização

A ANOVA do rendimento em líquido pirolenhoso pode ser observado no Quadro nº 24.

Quadro nº 24- Análise de variância do rendimento em líquido pirolenhoso

| FONTE DE VARIAÇÃO | G.L. | S.Q.    | Q.M.    | F.        |
|-------------------|------|---------|---------|-----------|
| Temperatura       | 3    | 13.3535 | 4.4512  | 2.2620 ns |
| Espécie           | 2    | 0.6641  | 0.3320  | 0.1687 ns |
| Interação(E.T)    | 6    | 29.6035 | 4.9339  | 2.5074 ns |
| (Tratamento)      | 11   | 43.6211 | 9.7171  | 4.9381 *  |
| Resíduo           | 12   | 23.6133 | 1.9678  |           |
| TOTAL             | 23   | 67.2344 | 11.6849 |           |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade.  
 ns Não significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Observa-se no Quadro nº 24 que as temperaturas, os tratamentos e suas interações não produzem efeito significativo no rendimento em líquido pirolenhoso ao nível de 5 % de probabilidade. Constata-se, portanto, que a variação dos rendimentos em líquido pirolenhoso entre as três espécies, em qualquer uma das temperaturas estudadas é insignificante.

#### 4.3.3. Rendimento em gases não condensáveis

O Quadro nº 25 apresenta os resultados do rendimento em gás não condensável, tomados em base seca, em função da temperatura de carbonização.

Quadro nº 25 - Rendimentos em peso do gás não condensável, tomado em base seca, das espécies estudadas em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURA<br>°C | Rendimentos em gás não condensável |           |             |           |         |           |
|-------------------|------------------------------------|-----------|-------------|-----------|---------|-----------|
|                   | Leucena                            |           | Catingueira |           | Pereiro |           |
|                   | %                                  | C.V.<br>% | %           | C.V.<br>% | %       | C.V.<br>% |
| 350               | 20.96                              | 9.41      | 20.56       | 2.61      | 22.93   | 11.72     |
| 450               | 23.44                              | 1.54      | 24.42       | 6.78      | 22.87   | 4.02      |
| 550               | 27.49                              | 10.91     | 28.62       | 3.09      | 23.35   | 10.18     |
| 750               | 28.01                              | 0.15      | 30.25       | 1.40      | 28.22   | 1.30      |

Para a melhor compreensão dos resultados, os dados apresentados no Quadro nº 25 foram plotados na Figura nº 07 que mostra que os rendimento em gases não condensáveis tendem a aumentar com o aumento da temperatura, fato confirmado pela análise estatística que demonstra que a temperatura produz efeito significativo, ao nível de 5 % de probabilidade, sobre o rendimento em gases não condensáveis. Estes resultados estão de acordo com GOMES & OLIVEIRA<sup>19</sup>, ALMEIDA<sup>21</sup>, FARIA<sup>15</sup> e BARBOSA<sup>24</sup> e podem ser explicados, segundo os mesmos autores, pelo fato de que o aumento da temperatura facilita a dissociação do carvão com a liberação dos gases e a gaseificação de parte de sua estrutura sólida.

A ANOVA do rendimento em gás não condensável pode ser observada no Quadro nº 26.

Quadro nº 26 - Análise de variância do rendimento em gás não condensável.

| FONTES DE VARIACÃO | G.L. | S.Q.     | Q.M.    | F        |
|--------------------|------|----------|---------|----------|
| Temperatura        | 3    | 187.3438 | 62.4479 | 24.2943* |
| Espécie            | 2    | 10.6533  | 5.3267  | 2.0722ns |
| Interação(E.T)     | 6    | 35.1289  | 5.8548  | 2.2777ns |
| (Tratamento)       | 11   | 233.1260 | 73.6294 | 28.6443* |
| Resíduo            | 12   | 30.8457  | 2.5705  |          |
| TOTAL              | 23   | 263.9717 | 76.1998 |          |

\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade  
 ns Não significativo ao nível de 5% de probabilidade

As temperaturas e os tratamentos apresentaram efeito significativo, ao nível de 5% de probabilidade, nos rendimentos em gás não condensável. As espécies e as interações entre espécies e temperaturas não apresentaram significância ao nível de 5% de probabilidade. Observa-se que neste estudo as espécies não influenciam nos resultados dos rendimentos dos gases não condensáveis, somente a temperatura de carbonização influenciam os mesmos.

A comparação dos rendimentos médios em gás não condensável, para as quatro temperaturas, dentro de uma média das três espécies pode ser observada no Quadro nº 27.

Quadro nº 27 - Quadro comparativo de médias - Rendimento em gás não condensável.

| TEMPERATURA<br>°C | ESPÉCIES     |                  |              | Médias<br>% |
|-------------------|--------------|------------------|--------------|-------------|
|                   | Leucena<br>% | Catingueira<br>% | Pereiro<br>% |             |
| 350               | 20.96        | 20.56            | 22.93        | 21.48 a     |
| 450               | 23.44        | 24.42            | 22.87        | 23.58 a     |
| 550               | 27.49        | 28.62            | 23.35        | 26.49 b     |
| 750               | 28.01        | 30.25            | 28.22        | 28.83 b     |
| Médias            | 24.98        | 25.96            | 24.34        |             |

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

O quadro comparativo de médias dos rendimentos em gás não condensável mostra que dentro de uma média das três espécies estudadas, não houve variação significativa no rendimento em gás não condensável entre as temperaturas de 350 e 450 °C e entre as temperaturas de 550 e 750 °C. Este fato pode ser visualizado na Figura nº 07 que mostra o comportamento do rendimento em gás não condensável para as três espécies em função da temperatura.



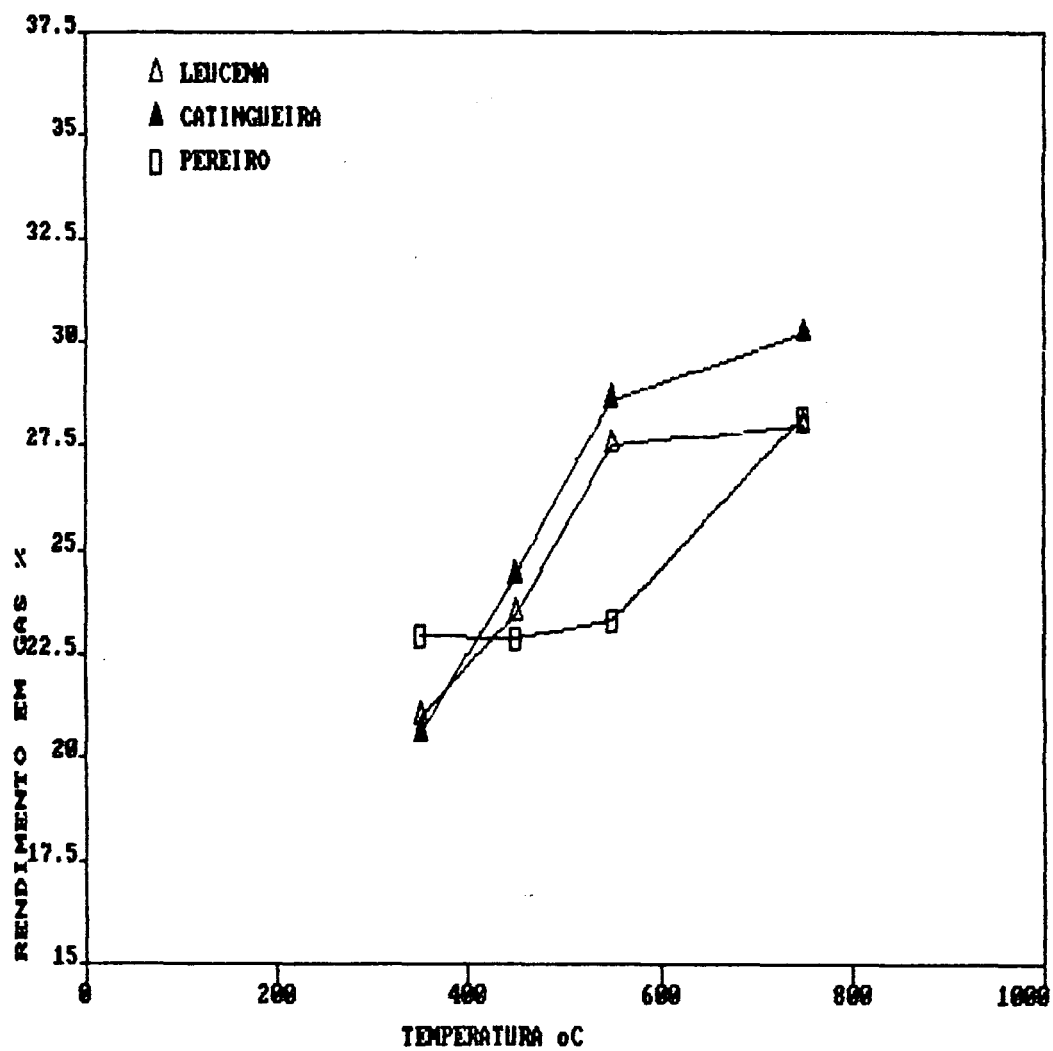


Figura nº 07 - Rendimento em gás não condensável em função da temperatura de carbonização

#### 4.3.4. Rendimento em alcatrão insolúvel

Os rendimentos em alcatrão insolúvel obtido na carbonização das três espécies utilizadas em função da temperatura estão apresentados no Quadro nº 28.

Quadro nº 28 - Rendimentos em peso do alcatrão insolúvel coletado, tomado em base seca, em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Rendimento do alcatrão insolúvel |      |             |       |         |       |
|--------------------|----------------------------------|------|-------------|-------|---------|-------|
|                    | ESPÉCIES                         |      |             |       |         |       |
|                    | Leucena                          | C.V. | Catingueira | C.V.  | Pereiro | C.V.  |
|                    | %                                | %    | %           | %     | %       | %     |
| 350                | 6.32                             | 2.35 | 3.45        | 13.34 | 8.38    | 17.89 |
| 450                | 7.24                             | 3.22 | 2.36        | 14.11 | 8.25    | 14.74 |
| 550                | 6.19                             | 5.71 | 3.24        | 25.75 | 8.86    | 15.00 |
| 750                | 5.87                             | 8.56 | 3.66        | 4.45  | 7.77    | 9.65  |

Os dados que constam no Quadro nº 28 demonstram que as três espécies apresentaram comportamentos adversos em relação ao rendimento de alcatrão insolúvel em função da temperatura. Estes resultados não correspondem aos encontrados por BARBOSA<sup>24</sup> que demonstra que o rendimento em alcatrão cresce com a elevação da temperatura. Estes resultados tão variáveis podem ter sido causados por perdas ocorridas durante as carbonizações e, também, ao elevado teor de umidade do alcatrão, implicando em falhas no processo de separação do mesmo com o ácido pirolenhoso.

Considerando-se a média dos rendimentos obtidos pode-se concluir que os mesmos estão em concordância com as médias obtidas por OLIVEIRA et alii<sup>22</sup> e BARBOSA<sup>24</sup> em experiências realizadas com as espécies *Eucalyptus grandis* e *Prosopis juliflora*.

A madeira de pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) apresentou os maiores rendimentos em alcatrão e a espécie catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) os menores índices de rendimento em alcatrão.

O Quadro nº 29 mostra a ANOVA para os rendimentos em alcatrão insolúvel.

Quadro nº 29 - Análise de variância dos rendimentos em alcatrão tomados em base seca.

| FONTE DE VARIAÇÃO | G.L. | S.Q.     | Q.M.    | F.       |
|-------------------|------|----------|---------|----------|
| Temperatura       | 3    | 0.3899   | 0.1299  | 0.2065ns |
| Espécie           | 2    | 68.0410  | 34.0205 | 54.0493* |
| Interação(E.T)    | 6    | 44.8344  | 7.4724  | 11.8716* |
| (Tratamento)      | 11   | 113.2653 | 41.6229 | 66.1273* |
| Resíduo           | 12   | 7.5532   | 0.6294  |          |
| TOTAL             | 23   | 120.8185 | 42.2523 |          |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade  
 ns Não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

O Quadro nº 29 demonstra que as espécies, as interações espécies e temperaturas e os tratamentos apresentam efeito significativo ao nível de 5 % de probabilidade e que as temperaturas não apresentaram variação significativa neste mesmo nível de probabilidade.

Observa-se que apenas as espécies influenciaram nos rendimentos em alcatrão, nas condições nas quais foi realizado este trabalho.

A Figura nº 08 mostra os rendimentos em alcatrão para as três espécies em função das temperaturas utilizadas.

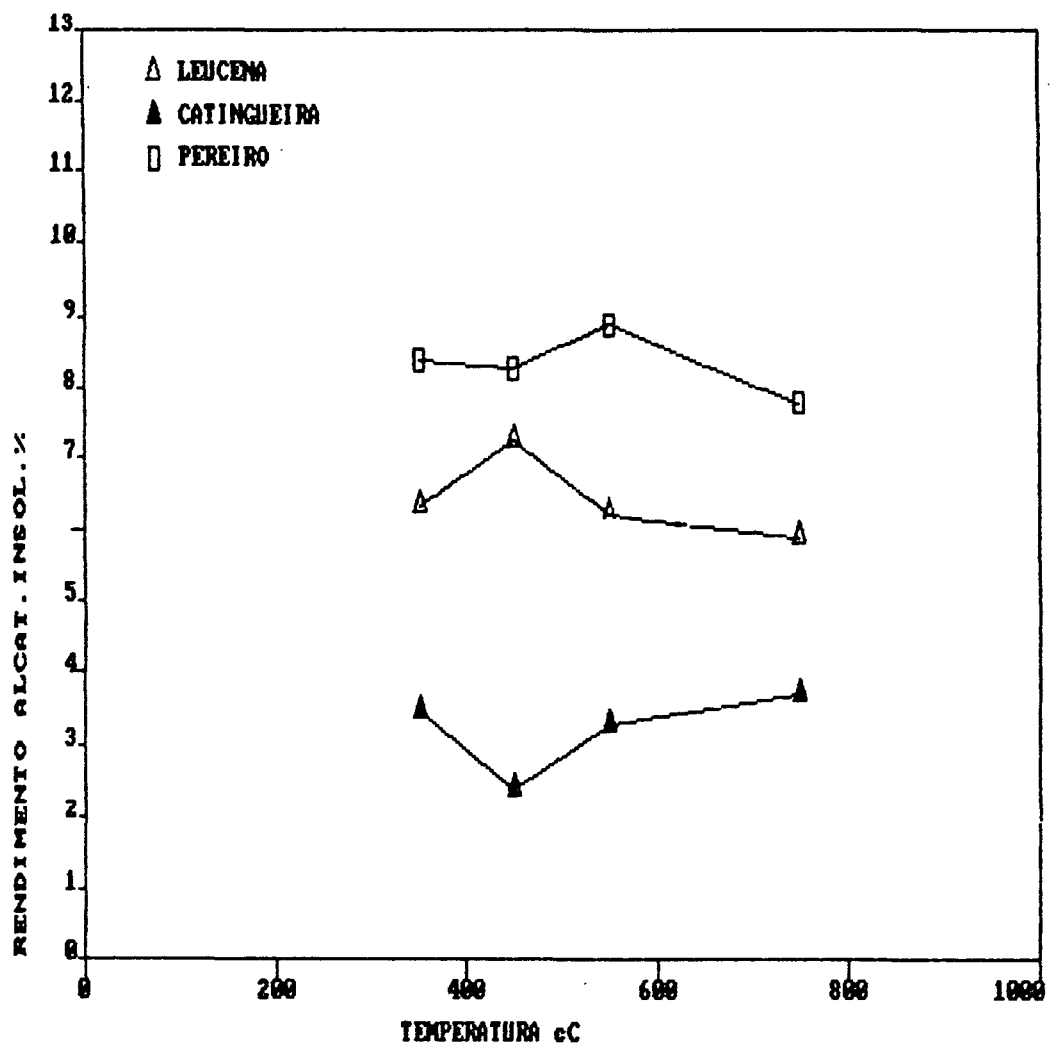


Figura nº 08 - Rendimento em alcatrão em função da temperatura de carbonização

O Quadro nº 30 apresenta a comparação entre a média dos rendimentos em alcatrão. Observa-se que a temperatura não produz efeito significativo em alcatrão.

Quadro nº 30 - Quadro comparativo de médias - Rendimento em alcatrão.

| TEMPERATURAS<br>°C | ESPÉCIES     |                  |              | Médias<br>% |
|--------------------|--------------|------------------|--------------|-------------|
|                    | Leucena<br>% | Catingueira<br>% | Pereiro<br>% |             |
| 350                | 6.32 a<br>A  | 3.45 a<br>B      | 8.38 a<br>C  | 6.05        |
| 450                | 7.24 a<br>A  | 2.36 a<br>B      | 8.25 a<br>A  | 5.95        |
| 550                | 6.19 a<br>A  | 3.24 a<br>B      | 8.86 a<br>C  | 6.10        |
| 750                | 5.87 a<br>A  | 3.66 a<br>B      | 7.77 a<br>A  | 5.77        |
| Médias             | 6.41<br>A    | 3.18<br>B        | 8.32<br>C    |             |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

Existe variação significativa no rendimento em alcatrão das três espécies tomando-se os índices dentro de uma média de quatro temperaturas. Ao estudar-se o comportamento de cada espécie dentro das quatro temperaturas de carbonização utilizadas, observa-se que não existe variação significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, no rendimento em alcatrão insolúvel a medida que se eleva a temperatura de carbonização. Porém, quando analisa-se o comportamento das três espécies dentro de cada uma das temperaturas de carbonização aplicada, nota-se que nas temperaturas de

350 e 550 °C existe variação significativa no rendimento em alcatrão entre as três espécies. O mesmo não ocorre nas temperaturas de 450 e 750 °C, nas quais a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) e o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) não apresentaram variação significativa, entre eles, no rendimento em alcatrão insolúvel. No entanto, esta variação ocorreu com as duas espécies em relação à catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul).

#### 4.4 - PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL

As propriedades do carvão vegetal foram analisadas em função dos aspectos químicos e físicos apresentados por este produto da carbonização.

##### 4.4.1. Composição química elementar

A composição química elementar do carvão vegetal obtido poderá ser observada no Quadro nº 31.

Quadro nº 31 - Composição química elementar do carvão vegetal, tomado em base seca, em função da temperatura de carbonização.

| Espécie     | Temperatura<br>°C | C<br>% | H<br>% | N<br>% | O<br>% |
|-------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| Leucena     | 350               | 78,32  | 3,69   | 1,30   | 16,69  |
|             | 450               | 78,96  | 3,56   | 0,77   | 16,71  |
|             | 550               | 87,18  | 2,70   | 1,05   | 9,07   |
| Catingueira | 350               | 69,01  | 3,25   | 0,76   | 26,98  |
|             | 450               | 74,32  | 2,77   | 1,02   | 21,89  |
|             | 550               | 77,61  | 2,39   | 1,00   | 19,00  |
| Pereiro     | 350               | 72,22  | 3,41   | 0,84   | 23,53  |
|             | 450               | 74,62  | 2,48   | 0,99   | 11,91  |
|             | 550               | 77,32  | 2,43   | 1,67   | 18,58  |

Pode-se constatar no Quadro nº 31 que o percentual do carbono possui relação direta com a temperatura. Conseqüentemente, a medida que se eleva a temperatura de carbonização, ocorre um aumento do teor de carbono total e uma diminuição dos percentuais de hidrogênio e oxigênio contidos no carvão vegetal. Estes resultados estão de acordo com WENZEL<sup>4B</sup> e ocorrem devido a liberação de compostos gasosos no decorrer da carbonização que consomem mais hidrogênio ou oxigênio do que o carbono.

#### 4.4.2. Análise imediata

Os resultados da análise imediata ( teores de carbono fixo, material volátil e cinzas) e os rendimentos em carbono fixo serão apresentados e discutidos a seguir demonstrando a influência exer-

cida pela temperatura de carbonização nas propriedades químicas do carvão vegetal.

Teor de carbono fixo:

Uma das mais importantes propriedades do carvão vegetal é o seu teor de carbono fixo. Neste trabalho foi realizada sua determinação, em base seca, para cada espécie em função da temperatura de carbonização. Estes resultados estão apresentados no Quadro nº 32.

Quadro nº 32 - Teor de carbono fixo, em base seca, em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Teor de carbono fixo |      |                  |      |              |      |
|--------------------|----------------------|------|------------------|------|--------------|------|
|                    | Leucena C.V.         |      | Catingueira C.V. |      | Pereiro C.V. |      |
|                    | %                    | %    | %                | %    | %            | %    |
| 350                | 62.89                | 4.76 | 63.09            | 0.26 | 58.25        | 2.20 |
| 450                | 79.91                | 0.19 | 71.02            | 0.54 | 68.23        | 0.58 |
| 550                | 79.13                | 0.59 | 74.23            | 0.46 | 69.92        | 1.02 |
| 750                | 83.36                | 0.14 | 77.76            | 0.26 | 81.29        | 0.70 |

Os resultados obtidos para teor de carbono fixo apresentam-se coerentes com os resultados apresentados pela literatura, ocorrendo um aumento no teor de carbono fixo à medida que se eleva a temperatura de carbonização. Este aumento é mais acentuado entre as temperaturas de 350 °C e 450 °C, provavelmente por haver uma maior degradação da holocelulose nesta faixa de temperatura, ficando como resíduo a lignina, constituinte da madeira que é a principal responsável pela formação do carvão vegetal.



A espécie que apresentou maior teor de carbono fixo foi a leucena (*Leucena leucocephala* Lam), e as espécies catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e pereiro (*Aspidosperma pyriformium* Mart) apresentaram índices médios similares entre si. Isto pode ser explicado em virtude da leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) ter apresentado maiores teores de lignina e celulose na análise química da madeira.

Os resultados encontrados para as três espécies são inferiores aos apresentados por OLIVEIRA et alii<sup>34</sup> que carbonizaram *Eucalyptus grandis*. FARIA<sup>10</sup> e BARBOSA<sup>34</sup>, testando as espécies jurema-preta (*Mimosa hostilis* Benth) e algaroba (*Prosopis juliflora* D.C.) também apresentaram índices superiores aos obtidos neste experimento.

A ANOVA do teor de carbono fixo pode ser analisada no Quadro nº 33.

Quadro nº 33 - Análise de variância das porcentagens dos teores de carbono fixo em base seca.

| -----             | ----- | -----     | -----    | -----     |
|-------------------|-------|-----------|----------|-----------|
| FONTE DE VARIAÇÃO | G.L.  | S.Q.      | Q.M.     | F         |
| -----             | ----- | -----     | -----    | -----     |
| Temperatura       | 3     | 1758.2030 | 586.0677 | 575.9437* |
| Espécie           | 2     | 234.4063  | 117.2031 | 115.1785* |
| Interação(E.T)    | 6     | 103.7188  | 17.2865  | 16.9878*  |
| (Tratamento)      | 11    | 2096.3281 | 720.5573 | 708.1101* |
| Resíduo           | 24    | 24.4219   | 1.0176   |           |
| -----             | ----- | -----     | -----    | -----     |
| TOTAL             | 35    | 2120.7500 | 721.5748 |           |
| -----             | ----- | -----     | -----    | -----     |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade

A Figura nº 09 apresenta o teor de carbono fixo para as três espécies em função da temperatura de carbonização.

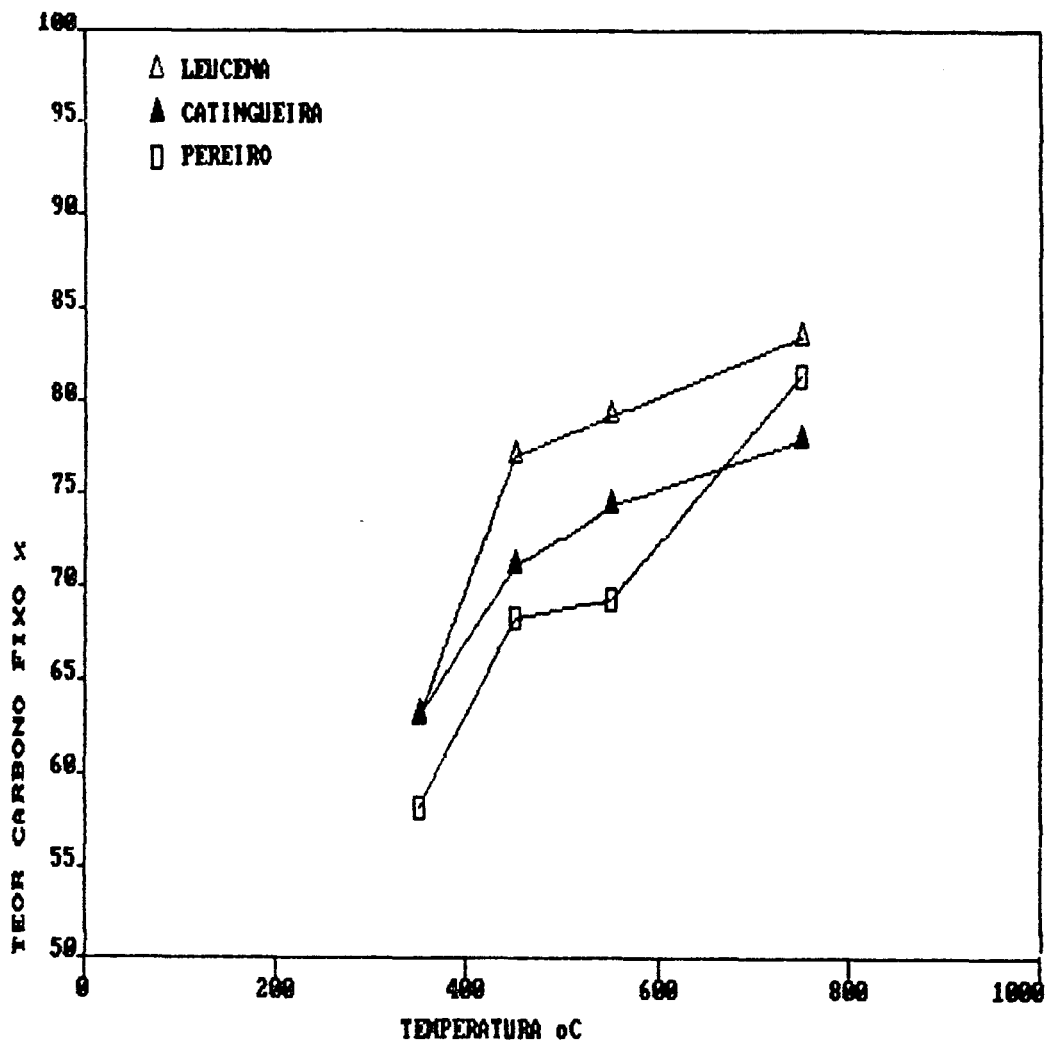


Figura nº 09 - Teor de carbono fixo em função da temperatura de carbonização

A análise estatística efetuada ao nível de 5 % de probabilidade, apresentada no Quadro nº 33, demonstra que as espécies, as temperaturas e suas interações influenciam nos resultados de teor de carbono fixo.

As comparações entre as médias dos teores de carbono fixo são apresentadas no Quadro nº 34.

Quadro nº 34 - Quadro comparativo de médias - Teor de carbono fixo

| TEMPERATURAS<br>°C | ESPÉCIES     |                  |              | Médias<br>% |
|--------------------|--------------|------------------|--------------|-------------|
|                    | Leucena<br>% | Catingueira<br>% | Pereiro<br>% |             |
| 350                | 62.89 a<br>A | 63.09 a<br>A     | 58.25 a<br>B | 61.41 a     |
| 450                | 79.91 b<br>A | 71.02 b<br>B     | 68.23 b<br>C | 72.05 b     |
| 550                | 79.13 b<br>A | 74.23 c<br>B     | 69.92 b<br>C | 74.43 c     |
| 750                | 83.36 c<br>A | 77.76 d<br>B     | 81.29 c<br>C | 80.80 d     |
| Médias             | 75.57<br>A   | 71.53<br>B       | 69.42<br>C   |             |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Pode-se observar que a espécie leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) apresenta o maior teor de carbono fixo numa média de todas as temperaturas. A temperatura de carbonização influencia no teor de carbono fixo para a média das três espécies.

Analisando-se o comportamento de cada espécie com a elevação da temperatura de carbonização, observa-se que tanto para a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) e o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) não houve diferença significativa pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade, no teor de carbono fixo obtido entre as temperaturas de 450 e 550 °C. Porém, a partir dos resultados obtidos para as três espécies dentro de cada temperatura, observa-se diferenças significativas no teor de carbono fixo obtido em todas as temperaturas de carbonização utilizadas, exceto à temperatura de 350 °C, na qual a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) e a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) não apresentaram variação significativa no teor de carbono fixo.

#### Teor de materiais voláteis:

Os resultados de teor de materiais voláteis obtidos na carbonização estão expostos no Quadro nº 35.

Quadro nº 35 - Teor de materiais voláteis, base seca, do carvão vegetal das três espécies utilizadas em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Teor de materiais voláteis |           |             |           |         |           |
|--------------------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|---------|-----------|
|                    | Leucena                    |           | Catingueira |           | Pereiro |           |
|                    | %                          | C.V.<br>% | %           | C.V.<br>% | %       | C.V.<br>% |
| 350                | 30,54                      | 7.93      | 29,58       | 1.26      | 32,58   | 5.19      |
| 450                | 15,54                      | 1.88      | 20,55       | 2.51      | 20,64   | 1.55      |
| 550                | 14,44                      | 3.53      | 15,94       | 1.41      | 17,68   | 7.12      |
| 750                | 8,55                       | 7.11      | 9,25        | 0.60      | 8,02    | 8.41      |

Houve uma redução do teor de materiais voláteis com o aumento da temperatura ocorreu para as três espécies utilizadas, sendo esta variação menos acentuada entre as temperaturas de 550 a 750 °C, conforme pode ser observado no Quadro nº 35 e na Figura nº 10, que ilustra a variação do teor de voláteis em função da temperatura.

OLIVEIRA et alii<sup>34</sup>, ALMEIDA<sup>31</sup>, FARIA<sup>15</sup> e BARBOSA<sup>34</sup> concordam que este fato é decorrente da expansão dos gases provocada pelo aumento da temperatura e com a conseqüente expulsão dos mesmos do interior do carvão.

Não foi realizada a ANOVA para o teor de voláteis pelo fato dos dados não atenderem às exigências do modelo aditivo utilizado no delineamento estatístico.

Teor de cinzas:

O Quadro nº 36 apresenta o teor de cinzas, tomado em base seca, do carvão vegetal das três espécies utilizadas em função da temperatura de carbonização.

Quadro nº 36 - Teor de cinzas, tomado em base seca, do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Teor de cinzas<br>ESPÉCIES |           |                  |           |              |           |
|--------------------|----------------------------|-----------|------------------|-----------|--------------|-----------|
|                    | Leucena<br>%               | C.V.<br>% | Catingueira<br>% | C.V.<br>% | Pereiro<br>% | C.V.<br>% |
| 350                | 2.51                       | 5.43      | 6.20             | 0.43      | 7.91         | 0.19      |
| 450                | 4.64                       | 0.57      | 7.54             | 0.81      | 9.25         | 0.61      |
| 550                | 5.07                       | 1.48      | 8.38             | 0.81      | 9.02         | 1.48      |
| 750                | 5.03                       | 5.74      | 8.82             | 1.90      | 9.26         | 2.18      |

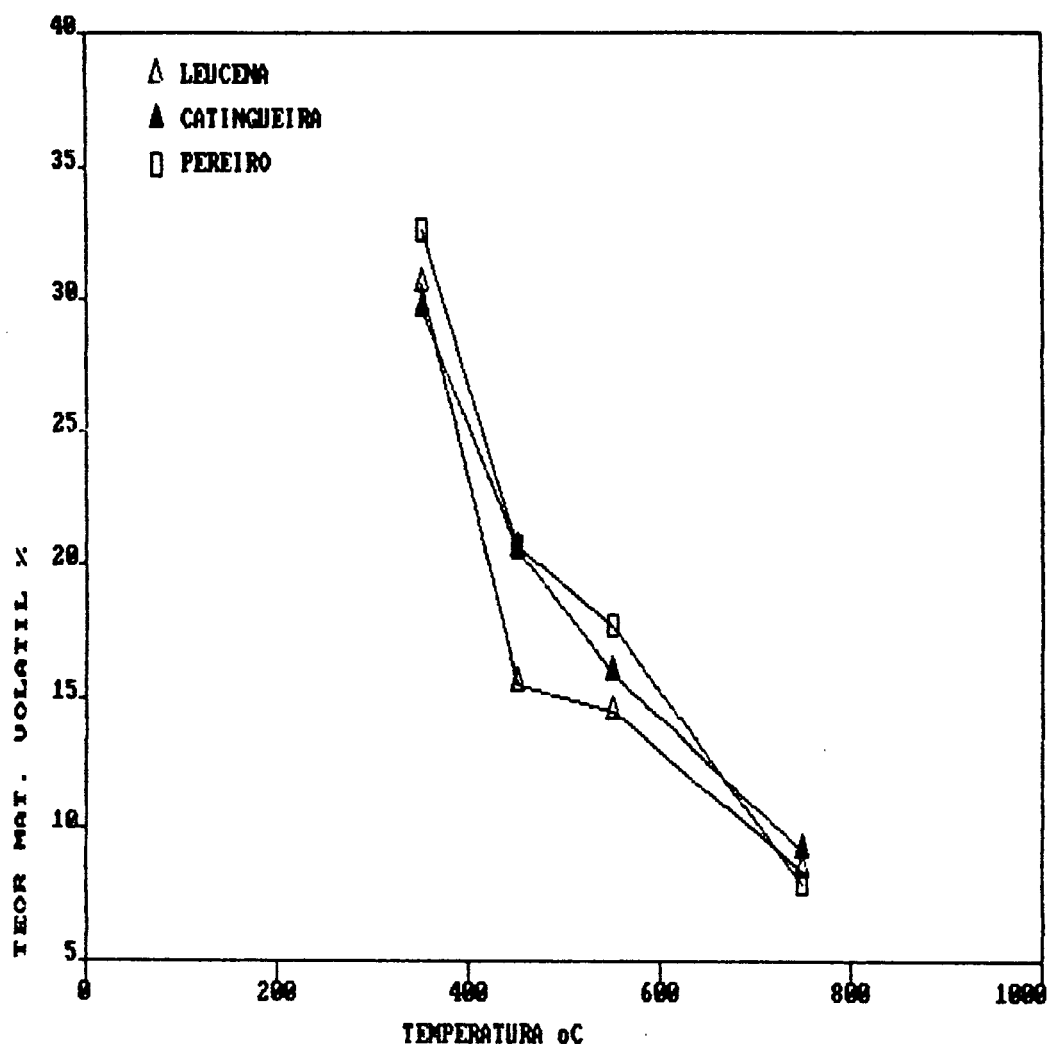


Figura nº 10 - Teor de materiais voláteis em função da temperatura de carbonização

O carvão obtido a partir das três espécies estudadas apresentou um aumento no teor de cinzas com a elevação da temperatura final de carbonização e uma tendência a estabilização entre as temperaturas de 550 e 750 °C. Estes dados estão de acordo com FARIA<sup>15</sup> e divergem de OLIVEIRA et alii<sup>34</sup> que obtiveram um decréscimo no teor de cinzas com a elevação da temperatura de carbonização utilizando *Eucalyptus grandis*. Os valores encontrados para as três espécies são superiores aos apresentados por FARIA<sup>15</sup> que carbonizou a jurema-preta (*Mimosa hostilis* Benth) e OLIVEIRA et alii<sup>34</sup> quando utilizaram *Eucalyptus grandis* como matéria-prima da carbonização. Este fato pode ser explicado pelas condições edafo-climáticas da região semi-árida, principalmente os solos que, segundo DUQUE<sup>13</sup>, é silicoso contendo regular teor de cálcio e potássio. que influenciam sensivelmente nas características químicas, físicas e anatômicas da madeira. Um outro fator que pode ser levado em consideração é a constatação de cristais romboédricos na estrutura anatômica das três espécies. Cristais romboédricos são, geralmente, formados por oxalato de cálcio e o alto teor deste elemento encontrado na análise química das cinzas do carvão das três espécies, apresentada no Quadro nº 39 na página nº 64, sugerem uma justificativa palpável para o elevado teor de cinzas encontrado no carvão.

A leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) foi a espécie que apresentou os menores teores de cinzas, enquanto o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Tul) forneceu os maiores índices de cinzas. Estes últimos dados não estão de acordo com o esperado, tendo em vista que na análise química da madeira, a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) foi a espécie que apresentou os maiores teores de cinzas e, portanto, deveria apresentar também maior teor de cinzas no carvão vegetal.

O Quadro nº 37 apresenta a ANOVA do teor de cinzas.

Quadro nº 37 - Análise de variância do teor de cinzas, base seca do carvão vegetal

| FONTE DE VARIACÃO | G.L. | S.Q.     | Q.M.    | F.         |
|-------------------|------|----------|---------|------------|
| Temperatura       | 3    | 25.8919  | 8.6306  | 433.4222*  |
| Espécie           | 2    | 134.4009 | 67.2004 | 3374.7500* |
| Interação(E.T)    | 6    | 3.0903   | 0.5151  | 25.8657*   |
| (Tratamento)      | 11   | 163.3831 | 76.3461 | 3834.0372* |
| Resíduo           | 24   | 0.4779   | 0.0199  |            |
| TOTAL             | 35   | 163.8610 | 76.3660 |            |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade  
ns Não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

A Figura nº 11 apresenta o teor de cinzas para as três espécies em função da temperatura de carbonização.



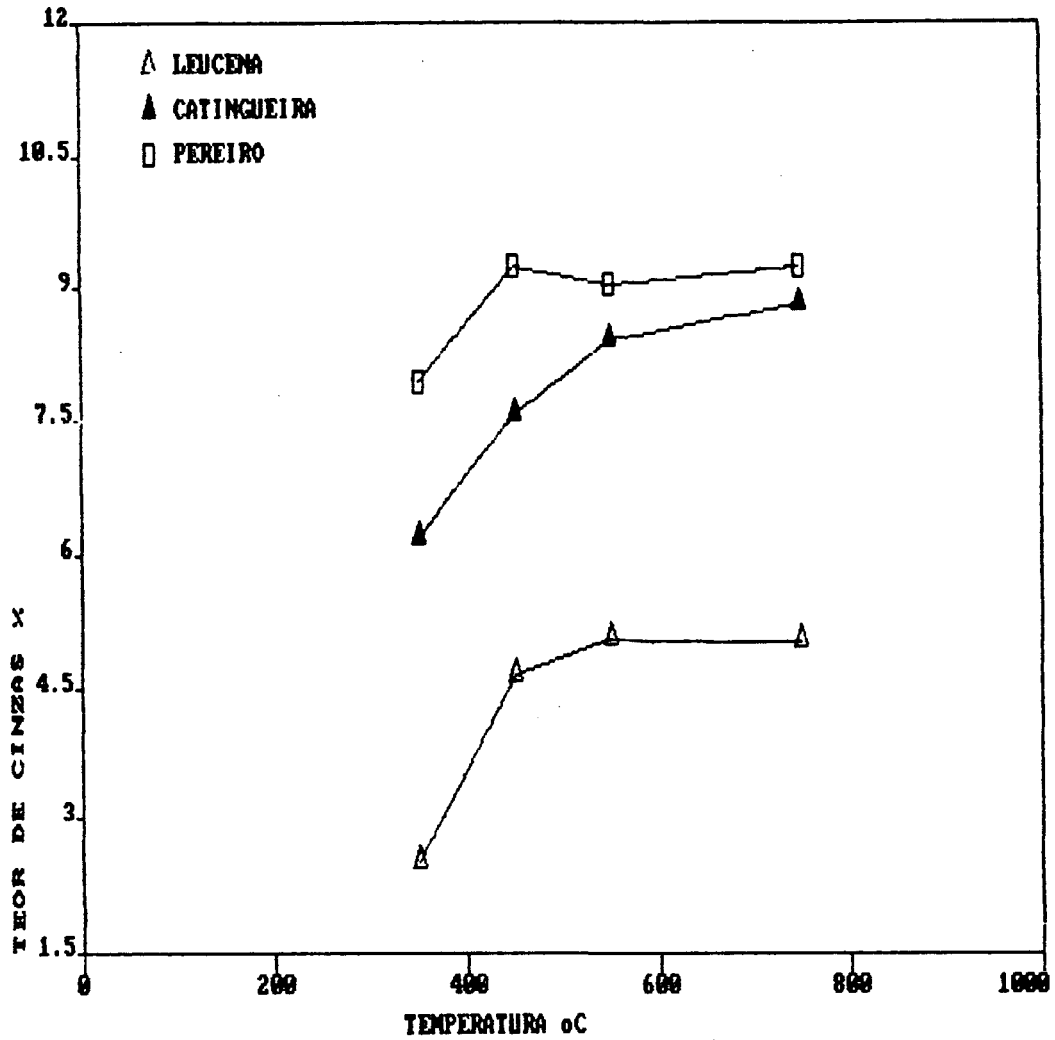


Figura nº 11 - Teor de cinzas em função da temperatura de carbonização

Observa-se no Quadro nº 37 que as espécies, as temperaturas e suas interações e os tratamentos são significativos ao nível de 5 % de probabilidade, ou seja, o teor de cinzas é influenciado pela temperatura de carbonização e pela espécie que deu origem ao carvão vegetal. Estes resultados concordam com a teoria de UHART<sup>14</sup> que afirma que o teor de cinzas do carvão vegetal depende da espécie que lhe deu origem..

O comportamento das espécies, temperaturas e suas interações podem ser analisados no Quadro nº 38.

Quadro nº 38 - Quadro comparativo de médias - Teor de cinzas no carvão vegetal.

| TEMPERATURAS<br>°C | ESPÉCIES     |                  |              | Médias<br>% |
|--------------------|--------------|------------------|--------------|-------------|
|                    | Leucena<br>% | Catingueira<br>% | Pereiro<br>% |             |
| 350                | 2.51 a<br>A  | 6.20 a<br>B      | 7.91 a<br>C  | 5.54 a      |
| 450                | 4.64 b<br>A  | 7.54 b<br>B      | 9.25 b<br>A  | 7.14 b<br>B |
| 550                | 5.07 c<br>A  | 8.38 c<br>B      | 9.02 b<br>C  | 4.79 c      |
| 750                | 5.03 c<br>A  | 8.82 d<br>B      | 9.26 b<br>C  | 7.70 d      |
| Médias             | 4.31<br>A    | 7.73<br>B        | 8.86<br>C    |             |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

Observa-se que o carvão vegetal obtido da espécie leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) apresentou os menores teores de cinzas nas quatro temperaturas estudadas. A temperatura de carbonização influencia significativamente no teor de cinzas do carvão vegetal dentro de uma média das três espécies. O mesmo raciocínio pode ser aplicado ao comparar-se os teores de cinzas de cada espécie, obtidos nas quatro temperaturas de carbonização. Porém, ao analisar-se individualmente o comportamento de cada espécie em função das quatro temperaturas de carbonização utilizadas, observa-se que o teor de cinzas do carvão obtido da espécie leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) não varia significativamente, pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, entre as temperaturas de 550 e 750 °C. A espécie pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart) não apresentou efeito significativo no teor de cinzas entre as temperaturas de 450 e 750 °C. No entanto, a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) sofreu influência da temperatura no teor de cinzas do carvão vegetal obtido com a carbonização desta espécie.

#### 4.4.3. Análise química das cinzas do carvão

A análise química das cinzas do carvão vegetal obtido com a carbonização das três espécies estudadas é apresentada no Quadro nº 39.

Quadro nº 39 - Análise química das cinzas do carvão vegetal

| Espécie     | CaO<br>% | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>% | MgO<br>% | SiO <sub>2</sub><br>% | S<br>% | P<br>% |
|-------------|----------|-------------------------------------|----------|-----------------------|--------|--------|
| Leucena     | 37,2     | 0,42                                | 8,38     | 1,01                  | 0,50   | 2,71   |
| Catingueira | 65,7     | 0,15                                | 1,20     | 0,05                  | 0,30   | 0,51   |
| Pereiro     | 54,2     | 0,30                                | 4,69     | 0,60                  | 0,23   | 1,01   |

Os resultados de óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e óxido de sílica (SiO<sub>2</sub>) apresentaram-se superiores aos encontrados em madeiras do gênero *Eucalyptus*, segundo OLIVEIRA et alii<sup>32</sup>. Este fato deve-se às características inerentes a cada espécie, bem como às condições edafo-climáticas da região semi-árida do Nordeste.

As três essências apresentaram teores de enxofre inferiores aos encontrados por OLIVEIRA et alii<sup>32</sup> em madeira de *Eucalyptus* sp.

#### 4.4.4. Rendimento em carbono fixo

O rendimento em carbono fixo pode ser analisado no Quadro nº 40 que mostra os resultados obtidos para cada espécie em função da temperatura de carbonização.

Quadro nº 40 - Rendimentos em carbono fixo em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Rendimento em carbono fixo<br>ESPÉCIES |                  |              |
|--------------------|--|------------------|--------------|
|                    | Leucena<br>%                           | Catingueira<br>% | Pereiro<br>% |
| 350                | 25,21                                  | 26,76            | 22,33        |
| 450                | 27,62                                  | 27,26            | 23,87        |
| 550                | 26,00                                  | 27,49            | 22,86        |
| 750                | 25,55                                  | 25,80            | 24,04        |

O Quadro nº 40 demonstra que o porcentual de variação no rendimento em carbono fixo em função da temperatura foi muito pequeno para as três espécies, mantendo-se praticamente constante nas quatro classes de temperatura utilizadas.

OLIVEIRA et alii <sup>34</sup> concordam com esta tendência do rendimento em carbono fixo manter-se constante quando se mantém fixa a velocidade de carbonização. Este fato é explicado com o aumento do teor de carbono fixo que ocorre com a elevação da temperatura de carbonização e, paralelamente, acontece uma perda de rendimento em carvão, fatores determinantes para o rendimento em carbono fixo.

A Figura nº 12 demonstra o comportamento do rendimento em carbono fixo em função da temperatura.

Observa-se que obteve-se os maiores rendimentos em carbono fixo com as espécies catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e leucena (*Leucaena leucocephala* Lam), o menor rendimento com o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart)

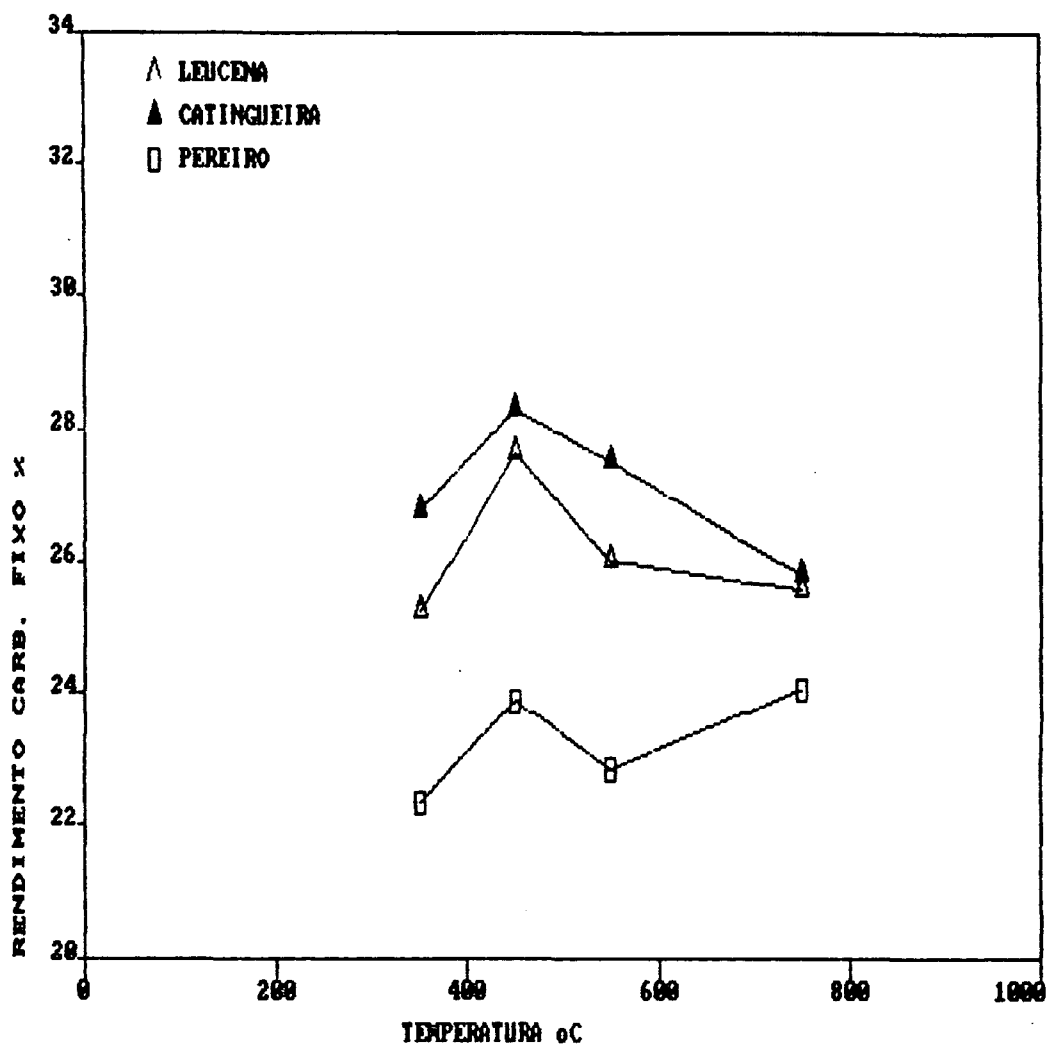


Figura nº 12 - Rendimento em carbono fixo em função da temperatura de carbonização

## 4.4.5. Poder calorífico superior do carvão

Os resultados de poder calorífico para as três espécies estudadas são apresentadas no Quadro nº 41.

Quadro nº 41 - Poder calorífico do carvão vegetal obtido para as espécies testadas em função da temperatura de carbonização.

| Espécie     | Temperatura de carbonização<br>°C | Poder calorífico superior C.V. |       |
|-------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------|
|             |                                   | kcal/kg                        | %     |
| Leucena     | 350                               | 6757                           | 0.01  |
|             | 450                               | 7197                           | 10.79 |
|             | 550                               | 7298                           | 3.31  |
|             | 750                               | 7149                           | 1.63  |
| Catingueira | 350                               | 6058                           | 0.12  |
|             | 450                               | 6406                           | 0.88  |
|             | 550                               | 6785                           | 2.92  |
|             | 750                               | 6554                           | 3.81  |
| Pereiro     | 350                               | 6235                           | 7.84  |
|             | 450                               | 6412                           | 7.10  |
|             | 550                               | 6602                           | 4.33  |
|             | 750                               | 6491                           | 1.53  |

Os resultados sugerem que para as três espécies ocorre um aumento no poder calorífico quando se eleva a temperatura de carbonização de 350 para 550 °C e uma leve redução nestes índices quando a temperatura passa de 550 para 750 °C, conforme é apresentado na Figura nº 13. Porém, estatisticamente, esta variação do poder calorífico em função da temperatura de carbonização não é significativa pelo teste de "F", conforme demonstra a análise estatística no Quadro nº 42.

A espécie que apresentou valores mais elevados de poder calorífico foi a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam), concordando com os maiores teores de carbono fixo demonstrados no Quadro nº 32, e pelos dados obtidos pela análise química elementar, apresentado no Quadro nº 29, onde esta essência apresenta maiores percentuais de carbono total e menores índices de oxigênio responsável pela formação de compostos como CO e CO<sub>2</sub>. Estes dados estão em concordância com FARIA<sup>10</sup> que afirma que o teor de carbono fixo e, também, as calorias fornecidas pelo carbono e hidrogênio são os responsáveis pelo poder calorífico.

Os resultados das três espécies apresentaram-se inferiores aos obtidos por COUTINHO<sup>11</sup>, carbonizando *Eucalyptus saligna* e BARBOSA<sup>14</sup>, quando carbonizou a *Prosopis juliflora* D.C..

O Quadro nº 42 apresenta a ANOVA para poder calorífico em função da temperatura.

Quadro nº 42 - Análise de variância do poder calorífico superior do carvão vegetal.

| FONTE DE VARIAÇÃO | G.L. | S.Q.    | Q.M.      | F.       |
|-------------------|------|---------|-----------|----------|
| Temperatura       | 3    | 939520  | 313173.4  | 2.8422ns |
| Espécie           | 2    | 2304384 | 1152192.0 | 10.4567* |
| Interação(E.T)    | 6    | 98624   | 16437.3   | 0.1492ns |
| (Tratamento)      | 11   | 3342528 | 1481812.7 | 13.4481* |
| Resíduo           | 12   | 1322240 | 110186.7  |          |
| TOTAL             | 23   | 4664768 | 1591989.4 |          |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade  
 ns Não significativo ao nível de 5 % de probabilidade



A análise de variância apresentada no Quadro nº 42 demonstra que apenas as espécies e os tratamentos produzem efeito significativo no poder calorífico do carvão vegetal.

O comportamento das médias do poder calorífico pode ser analisado no Quadro nº 43.

Quadro nº 43 - Quadro comparativo de médias - Poder calorífico do carvão vegetal.

| TEMPERATURAS<br>°C | ESPÉCIES           |                        |                    | Médias<br>kcal/kg |
|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|-------------------|
|                    | Leucena<br>kcal/kg | Catingueira<br>kcal/kg | Pereiro<br>kcal/kg |                   |
| 350                | 6757               | 6058                   | 6235               | 6350              |
| 450                | 7197               | 6406                   | 6412               | 6672              |
| 550                | 7298               | 6785                   | 6602               | 6895              |
| 750                | 7149               | 6554                   | 6491               | 6731              |
| Médias             | 7100<br>A          | 6451<br>B              | 6435<br>B          |                   |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

O carvão da leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) mostra possuir poder calorífico significativamente superior as demais espécies, provavelmente devido ao fato desta espécie apresentar maior teor de lignina na madeira. Não existe diferença significativa, pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, nos resultados de poder calorífico entre a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart).

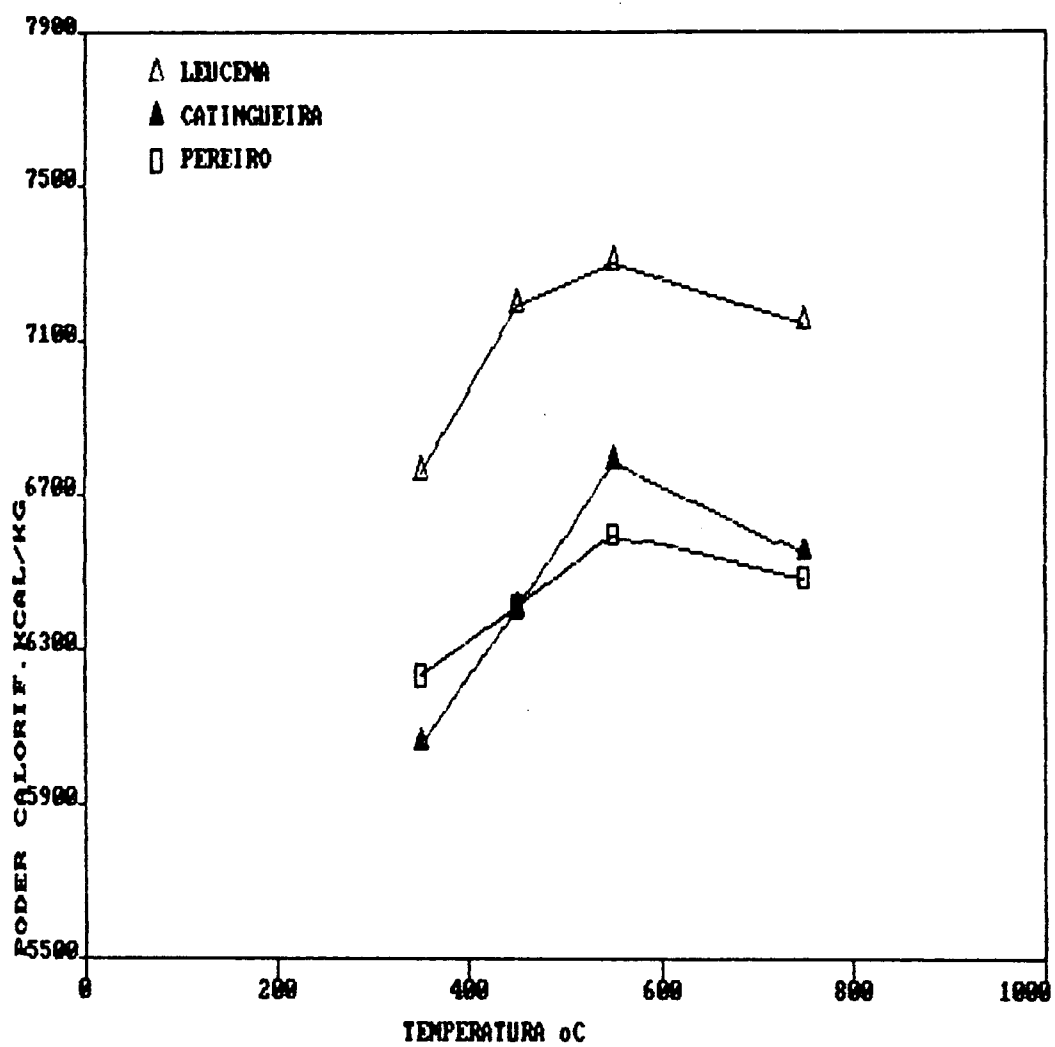


Figura nº 13 - Poder calorífico do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização

#### 4.4.6. Propriedades físicas do carvão vegetal.

As propriedades físicas do carvão vegetal serão analisadas em função das densidades aparente e verdadeira, porosidade e friabilidade deste produto em função da temperatura de carbonização.

Densidade aparente:

A influência da massa específica aparente da madeira com a densidade do carvão vegetal pode ser observada relacionando-se os valores obtidos no Quadro nº 44 com os valores de massa específica aparente da madeira apresentados no Quadro nº 18.

Quadro nº 44 - Densidade aparente do carvão vegetal das espécies utilizadas em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Densidade aparente<br>ESPÉCIES |           |                                  |           |                              |           |
|--------------------|--------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
|                    | Leucena<br>g/cm <sup>3</sup>   | C.V.<br>% | Catingueira<br>g/cm <sup>3</sup> | C.V.<br>% | Pereiro<br>g/cm <sup>3</sup> | C.V.<br>% |
| 350                | 0.35                           | 3.27      | 0.55                             | 6.56      | 0.45                         | 3.85      |
| 450                | 0.33                           | 8.02      | 0.52                             | 3.33      | 0.42                         | 2.38      |
| 550                | 0.32                           | 1.79      | 0.52                             | 1.12      | 0.44                         | 1.30      |
| 750                | 0.36                           | 1.62      | 0.58                             | 2.65      | 0.50                         | 1.16      |

Nota-se que as espécies que apresentaram menores massas específicas aparentes obtiveram valores mais baixos de densidade aparente de carvão. Ao analisar-se a influência da temperatura de carbonização na densidade aparente do carvão vegetal constata-se que, as três espécies comportaram-se de maneira similar, ocorrendo um decréscimo da densidade aparente até cerca de 550 °C e um aumento entre as temperaturas de 550 °C e 750 °C. Estes dados estão de acordo com BARBOSA<sup>24</sup> e OLIVEIRA et alii<sup>24</sup> que atribuem o fenômeno a ocorrência de perda de massa entre as temperaturas de 300 e 500 °C, devido a liberação dos voláteis não acompanhada em termos proporcionais pelas variações dimensionais no carvão, resultando em menor valor de densidade aparente. Na faixa de temperatura de 500 a 700 °C a variação dimensional é superior ao efeito da perda de massa, tendo como consequência maiores valores de densidade aparente a 700 °C. Este comportamento pode ser melhor analisado na Figura nº 14 que mostra a variação da densidade aparente do carvão vegetal das três espécies em função da temperatura.

Em discordância com estes resultados, COUTINHO<sup>14</sup> descreve que obteve um decréscimo gradual e linear da densidade do carvão com o aumento da temperatura em uma faixa de 400 até 1000 °C, carbonizando *Eucalyptus saligna*.

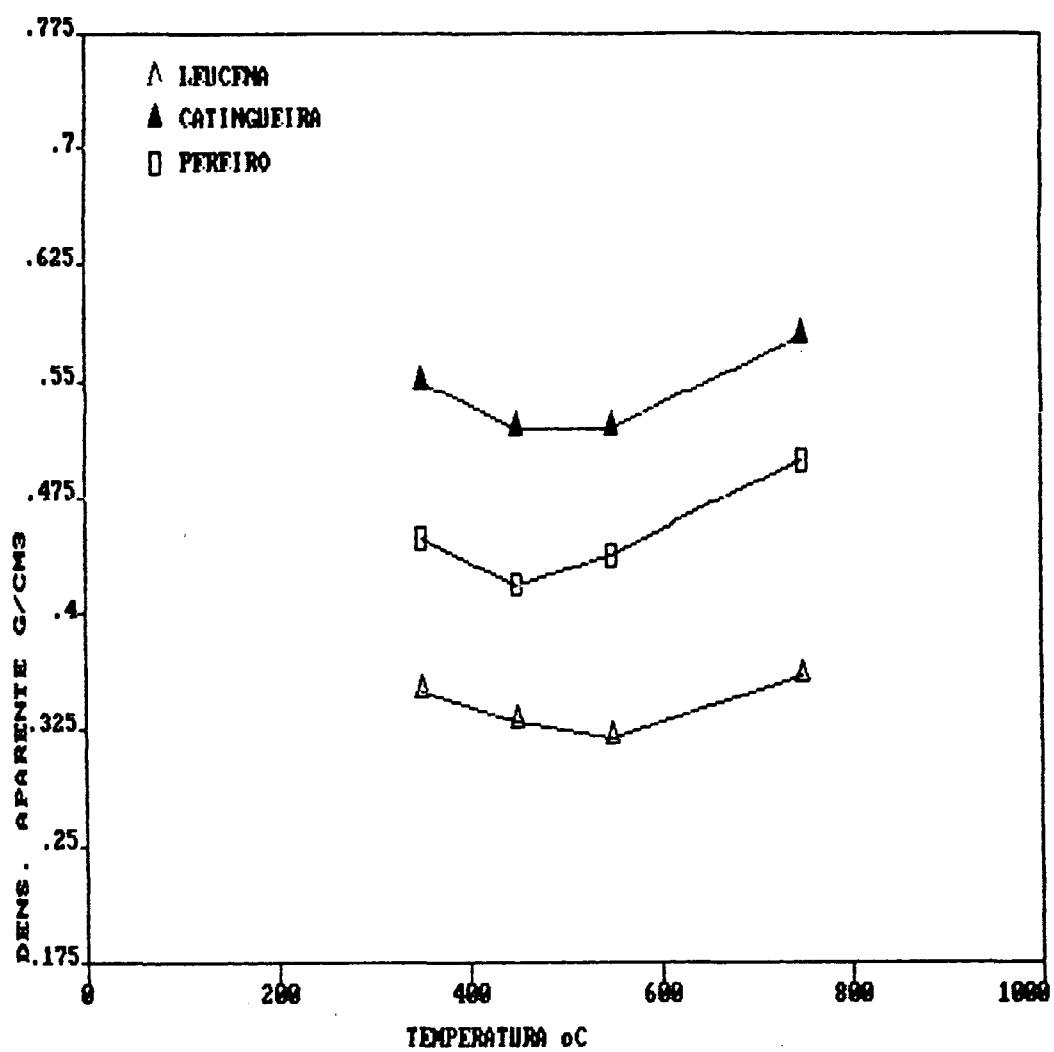


Figura nº 14 - Densidade aparente do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização

O Quadro nº 45 apresenta a ANOVA para a densidade aparente do carvão vegetal.

Quadro nº 45 - Análise de variância da densidade aparente do carvão vegetal

| FONTE DE VARIAÇÃO | G.L. | S.Q.      | Q.M.      | F.        |
|-------------------|------|-----------|-----------|-----------|
| Temperatura       | 3    | 1.4079E-3 | 4.6931E-4 | 19.7707*  |
| Espécie           | 2    | 2.2423E-2 | 1.1212E-2 | 472.3126* |
| Interação(E.T)    | 6    | 1.9878E-4 | 3.3130E-5 | 1.3957ns  |
| (Tratamento)      | 11   | 2.4030E-2 | 1.1714E-2 | 493.4789* |
| Resíduo           | 24   | 5.6970E-4 | 2.3738E-5 |           |
| TOTAL             | 35   | 2.4599E-2 | 1.1738E-2 |           |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade  
 ns Não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

Conforme os valores de "F" obtidos na análise de variância, pode-se verificar que os tratamentos, as espécies e as temperaturas produzem efeito significativo no  $\log(y+1)$  da densidade aparente do carvão vegetal, ao nível de 5 % de probabilidade. As interações entre as espécies e as temperaturas não apresentam significância ao nível de 5 % de probabilidade.

O Quadro nº 46 descreve o comportamento da média da densidade aparente do carvão vegetal obtido para cada espécie em relação a temperatura de carbonização.

Quadro nº 46 - Quadro comparativo de médias - Densidade aparente do carvão vegetal

| TEMPERATURAS<br>°C | ESPÉCIES                     |                                  |                              | Médias<br>g/cm <sup>3</sup> |   |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|
|                    | Leucena<br>g/cm <sup>3</sup> | Catingueira<br>g/cm <sup>3</sup> | Pereiro<br>g/cm <sup>3</sup> |                             |   |
| 350                | 0.35                         | 0.55                             | 0.45                         | 0.45                        | a |
| 450                | 0.33                         | 0.52                             | 0.42                         | 0.42                        | b |
| 550                | 0.32                         | 0.52                             | 0.44                         | 0.43                        | c |
| 750                | 0.36                         | 0.58                             | 0.50                         | 0.48                        | a |
| Médias             | 0.34<br>A                    | 0.54<br>B                        | 0.45<br>C                    |                             |   |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

Observa-se que o carvão vegetal da catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) apresenta-se como o mais denso dentro de uma média das quatro temperaturas de carbonização utilizadas. Ocorre uma diminuição significativa na densidade aparente das três espécies entre as temperaturas de 450 °C e 550 °C.

Densidade verdadeira:

Os resultados da densidade verdadeira do carvão vegetal obtido para cada espécie em função da temperatura de carbonização, estão apresentados no Quadro nº 47.

Quadro nº 47 - Densidade verdadeira do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Densidade verdadeira |      |                              |      |                   |      |
|--------------------|----------------------|------|------------------------------|------|-------------------|------|
|                    | Leucena C.V.         |      | ESPÉCIES<br>Catingueira C.V. |      | Pereiro C.V.      |      |
|                    | g/cm <sup>3</sup>    | %    | g/cm <sup>3</sup>            | %    | g/cm <sup>3</sup> | %    |
| 350                | 1.22                 | 0.00 | 1.30                         | 0.00 | 1.20              | 0.00 |
| 450                | 1.35                 | 3.25 | 1.27                         | 7.25 | 1.24              | 5.13 |
| 550                | 1.44                 | 1.55 | 1.57                         | 7.72 | 1.39              | 5.41 |
| 750                | 1.39                 | 2.65 | 1.64                         | 7.39 | 1.57              | 7.72 |

Em relação a densidade verdadeira os dados sugerem um acréscimo da mesma com a elevação da temperatura de carbonização, apresentando uma brusca variação entre as temperaturas de 550 °C e 750 °C, conforme a Figura nº 15, que ilustra a variação da densidade verdadeira em função da temperatura .

Este comportamento foi característico para as três espécies e estão de acordo com MENDES et alii<sup>20</sup> que explicam o fenômeno pela ocorrência de um rearranjo dos átomos de carbono, evidenciando uma tendência ao reordenamento do material lenhoso com a diminuição da distância média entre os átomos e, em consequência, o aumento da densidade verdadeira.

Nota-se que a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) apresenta os maiores valores de densidade verdadeira do carvão, o que já era esperado pelo fato desta espécie ter demonstrado possuir maiores valores de densidades aparente do carvão e da madeira, conforme pode ser observado nos Quadros nºs 44 e 18. Os resultados obtidos para esta espécie e, também, para o pereiro (*Aspidosperma pyriforme* Mart) estão dentro da média dos dados en-



contrados por OLIVEIRA et alii<sup>32</sup> para madeira de *Eucalyptus grandis*.

Os resultados mostraram que o carvão da leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) possui os menores índices de densidade verdadeira, fato também esperado tendo em vista ser uma espécie de rápido crescimento. Os dados obtidos para esta espécie apresentam-se semelhantes aos encontrados para a algaroba (*Prosopis juliflora* D.C.), em pesquisas realizadas por BARBOSA<sup>34</sup>.

A ANOVA da densidade verdadeira do carvão vegetal é apresentada no Quadro nº 48.

Quadro nº 48 - Análise de variância da densidade verdadeira do carvão vegetal.

| FONTE DE VARIAÇÃO | G.L. | S.Q.      | Q.M.      | F        |
|-------------------|------|-----------|-----------|----------|
| Temperatura       | 3    | 0.5615    | 0.1872    | 27.2565* |
| Espécie           | 2    | 7.5409E-2 | 3.7704E-2 | 5.4909*  |
| Interação(E.T)    | 6    | 8.7059E-2 | 1.4510E-2 | 2.1130ns |
| (Tratamento)      | 11   | 0.7240    | 0.2394    | 34.8604* |
| Resíduo           | 24   | 0.1648    | 6.8668E-3 |          |
| TOTAL             | 35   | 0.8888    | 0.2462    |          |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade

ns Não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

Os resultados da análise de variância demonstram que as espécies, as temperaturas e os tratamentos produzem efeito significativo, ao nível de 5 % de probabilidade, na densidade verdadeira do carvão vegetal. As interações entre as espécies e as temperaturas não apresentam variações significativas ao nível de 5 % de probabilidade.

A comparação das médias das espécies e das temperaturas pode ser observada no Quadro nº 49.

Quadro nº 49 - Quadro comparativo de médias - Densidade verdadeira do carvão vegetal.

| TEMPERATURAS<br>°C | ESPÉCIES                     |                                  |                              |                             |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                    | Leucena<br>g/cm <sup>3</sup> | Catingueira<br>g/cm <sup>3</sup> | Pereiro<br>g/cm <sup>3</sup> | Médias<br>g/cm <sup>3</sup> |
| 350                | 1.22                         | 1.30                             | 1.20                         | 1.24 b                      |
| 450                | 1.35                         | 1.27                             | 1.24                         | 1.29 b                      |
| 550                | 1.44                         | 1.57                             | 1.39                         | 1.45 a                      |
| 750                | 1.39                         | 1.64                             | 1.57                         | 1.53 a                      |
| Médias             | 1.34<br>A                    | 1.45<br>B                        | 1.35<br>A                    |                             |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

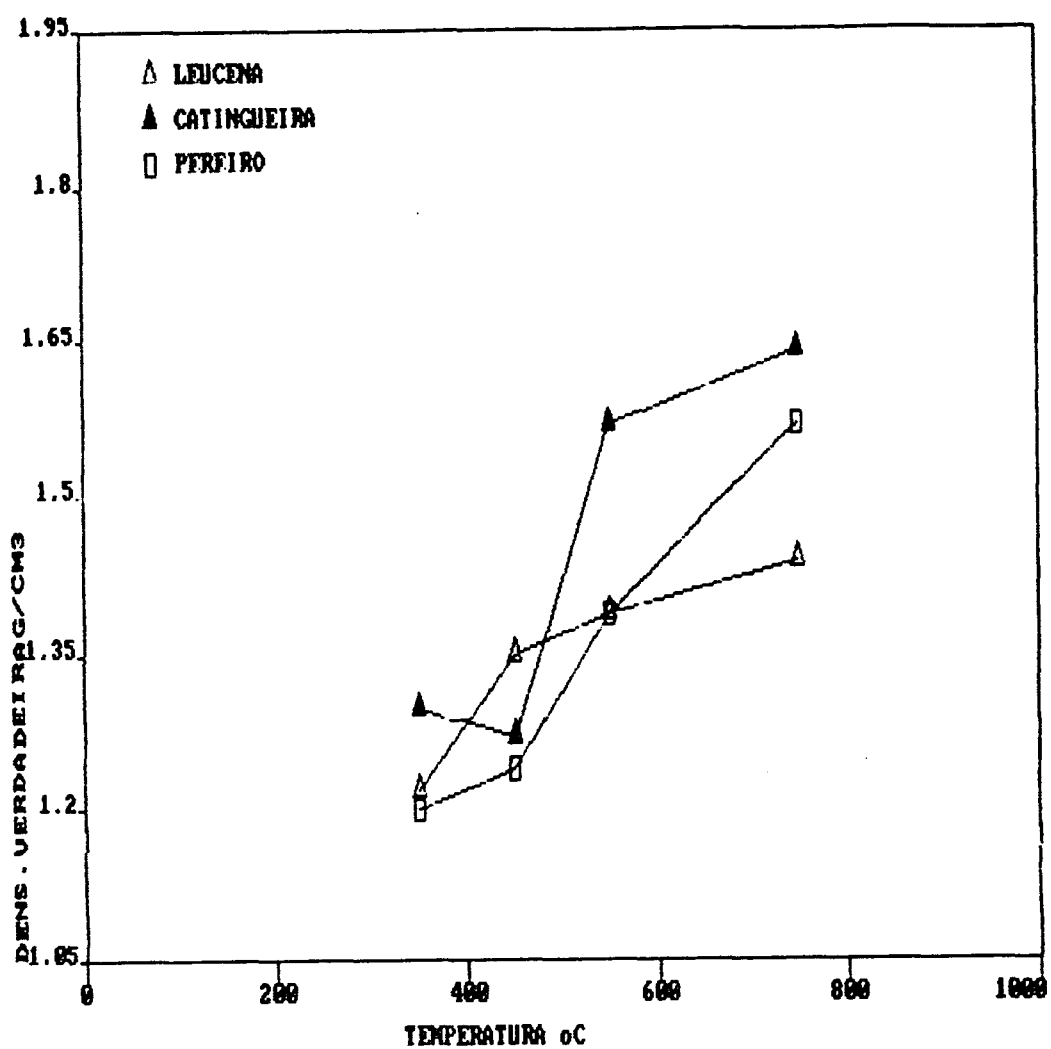


Figura nº 15 - Densidade verdadeira do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização

Observa-se que para uma média das três espécies não existe influência da temperatura de carbonização, pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, na densidade verdadeira do carvão vegetal entre as temperaturas de 350 e 450 °C e entre as temperaturas de 550 e 750 °C, concordando com a teoria apresentada por OLIVEIRA et alii<sup>24</sup>.

Pode-se notar no quadro comparativo de médias que não existe variação significativa entre as densidades verdadeiras do carvão vegetal das espécies leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) e pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart), tomadas dentro de uma média das quatro temperaturas de carbonização. Este fato pode estar relacionado com a massa específica da espécie vegetal, tendo em vista que os resultados de massa específica aparente obtidos para estas duas espécies foram muito semelhantes.

#### Porosidade:

Os resultados de porosidade do carvão vegetal, obtidos através das densidades aparente e verdadeira deste carvão, estão expostas no Quadro nº 50 que apresenta estes valores de porosidade obtidos em função da temperatura de carbonização.

Quadro nº 50 - Porosidade do carvão vegetal das três espécies utilizadas em função da temperatura de carbonização.

| TEMPERATURAS<br>°C | Porosidade do carvão vegetal |                  |              |      |       |      |
|--------------------|------------------------------|------------------|--------------|------|-------|------|
|                    | ESPÉCIES                     |                  |              |      |       |      |
|                    | Leucena C.V.                 | Catingueira C.V. | Pereiro C.V. |      |       |      |
|                    | %                            | %                | %            | %    | %     | %    |
| 350                | 71.04                        | 1.33             | 57.69        | 4.80 | 62.50 | 2.31 |
| 450                | 75.46                        | 3.25             | 58.96        | 7.06 | 67.39 | 5.11 |
| 550                | 76.63                        | 1.55             | 66.95        | 4.18 | 68.35 | 3.10 |
| 750                | 75.20                        | 2.65             | 64.67        | 5.43 | 68.25 | 3.22 |

A influência da temperatura de carbonização na porosidade do carvão vegetal pode ser observada no Quadro nº 50 e na Figura nº 16 que demonstram que o carvão obtido com as três espécies apresentaram uma tendência a aumentar a sua porosidade entre as temperaturas de 350 e 550 °C. Isto era esperado devido a eliminação da maior quantidade de materiais voláteis nesta faixa de temperatura, conforme pode ser observado no Quadro nº 35, sem que houvesse a ocorrência de contração da parede celular do carvão.

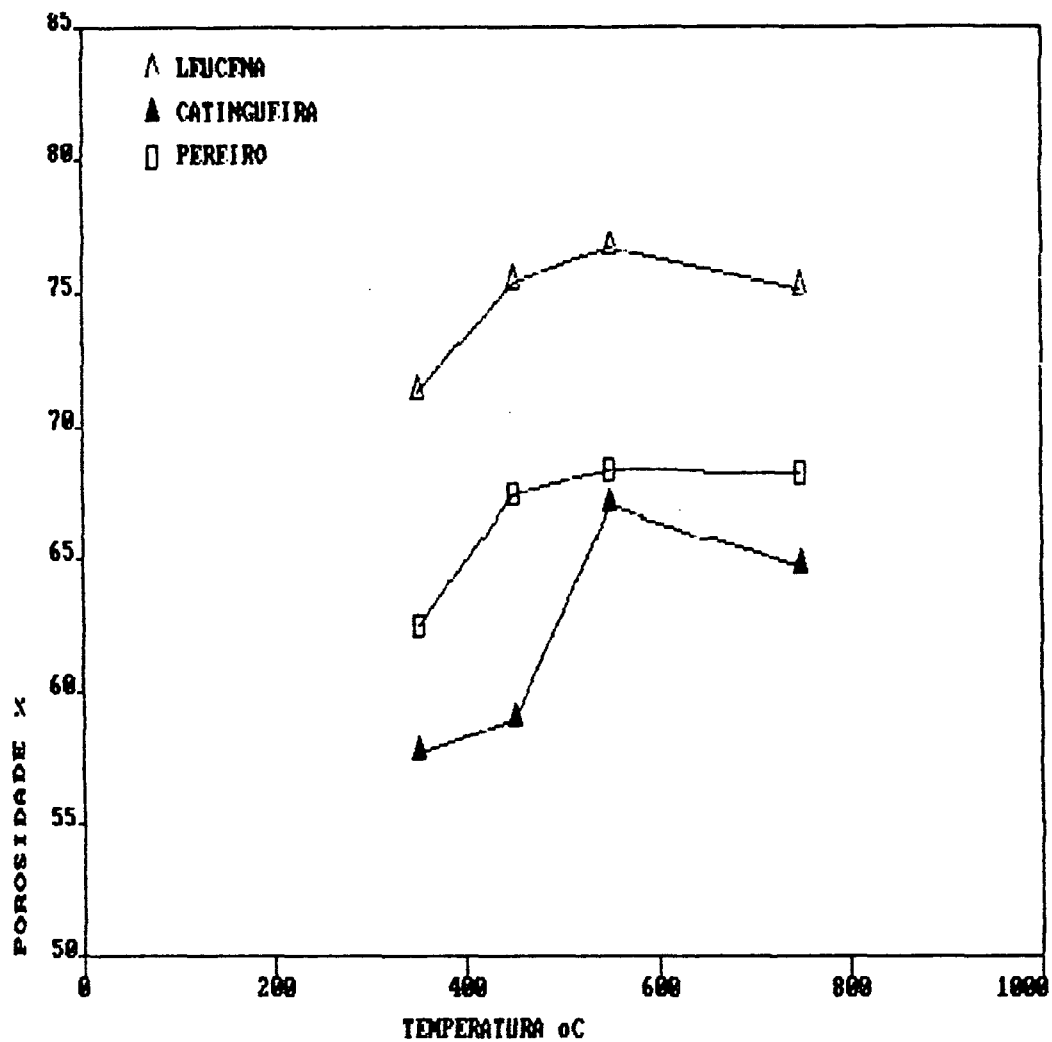


Figura nº 16 - Porosidade do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização

O Quadro nº 51 apresenta a ANOVA para a porosidade do carvão vegetal.

Quadro nº 51 - Análise de variância para a porosidade do carvão vegetal

| -----             | ----- | -----    | -----    | -----    |
|-------------------|-------|----------|----------|----------|
| FONTE DE VARIAÇÃO | G.L.  | S.Q.     | Q.M.     | F        |
| -----             | ----- | -----    | -----    | -----    |
| Temperatura       | 3     | 89.0938  | 29.6979  | 12.1303* |
| Espécie           | 2     | 370.6875 | 185.3438 | 75.7048* |
| Interação(E.T)    | 6     | 20.3125  | 3.3854   | 1.3828ns |
| (Tratamento)      | 11    | 480.0938 | 218.4271 | 89.2179* |
| Resíduo           | 24    | 58.7578  | 2.4482   |          |
| -----             | ----- | -----    | -----    | -----    |
| TOTAL             | 35    | 538.8516 | 220.8754 |          |
| -----             | ----- | -----    | -----    | -----    |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade  
 ns Não significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Os dados do Quadro nº 51 mostram que as espécies, as temperaturas e os tratamentos do arc sen da porosidade do carvão vegetal apresentam diferenças significativas ao nível de 5 % de probabilidade. As interações espécies e temperaturas não apresentam efeito significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

O Quadro nº 52 apresenta as médias obtidas para cada espécie em função da temperatura de carbonização.

Quadro nº 52 - Quadro comparativo de médias - Porosidade do carvão vegetal

| TEMPERATURAS<br>°C | ESPÉCIES     |                  |              | Médias<br>% |
|--------------------|--------------|------------------|--------------|-------------|
|                    | Leucena<br>% | Catingueira<br>% | Pereiro<br>% |             |
| 350                | 71.31        | 57.69            | 62.50        | 63.83 a     |
| 450                | 75.46        | 58.96            | 67.39        | 67.27 b     |
| 550                | 76.63        | 66.95            | 68.35        | 70.64 c     |
| 750                | 75.20        | 64.67            | 68.25        | 69.37 c     |
| Médias             | 74.65<br>A   | 62.07<br>B       | 66.62<br>C   |             |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Nota-se que o carvão da catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) apresentou o menor índice de porosidade dentro de uma média das quatro temperaturas utilizadas, reafirmando-se como a espécie mais densa entre as três estudadas. Pode-se observar o percentual de porosidade média das três espécies aumenta significativamente com a elevação da temperatura de carbonização, até a temperatura de 550 °C. Entre as temperaturas de 550 e 750 °C esta variação não foi significativa.



## Friabilidade:

Os resultados obtidos no teste de tamboramento tiveram comportamento similar para as três espécies com relação a temperatura de carbonização, conforme pode ser observado no Quadro nº 53. Obteve-se menores valores de porcentagem de finos para as temperaturas de 350 e 750 °C e um aumento destes valores entre as temperaturas de 450 e 550 °C.

Quadro nº 53 - Percentual de finos, abaixo de 12mm, após o teste de tamboramento

| Espécie     | Temperatura<br>°C | Percentual de finos<br>abaixo de 12mm | C.V.<br>% |
|-------------|-------------------|---------------------------------------|-----------|
| Leucena     | 350               | 6.07                                  | 6.86      |
|             | 450               | 7.33                                  | 4.17      |
|             | 550               | 8.73                                  | 3.50      |
|             | 750               | 7.33                                  | 16.44     |
| Catingueira | 350               | 11.70                                 | 6.20      |
|             | 450               | 14.37                                 | 6.65      |
|             | 550               | 13.91                                 | 2.51      |
|             | 750               | 10.20                                 | 7.07      |
| Pereiro     | 350               | 9.33                                  | 8.11      |
|             | 450               | 11.93                                 | 3.87      |
|             | 550               | 13.60                                 | 6.41      |
|             | 750               | 9.30                                  | 6.32      |

Os resultados obtidos estão em concordância com OLIVEIRA et alii<sup>34</sup> e podem ser explicados devido aos seguintes fatores:

- Aumento da porosidade do carvão entre as temperaturas de 450 e 550 °C que, conseqüentemente, irá fornecer maior área de acesso a difusão de CO<sub>2</sub>, provocando maior consumo de carvão e sua fragilização.

- Rearranjo da estrutura amorfa do carvão a temperaturas superiores a 550 °C, aumentando a quantidade de material lenhoso por unidade de área e aumento da resistência do carvão.

O carvão da catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) gerou o maior porcentual de finos no teste de tamboramento. Estes resultados devem-se ao fato desta espécie apresentar cerne já formado. O cerne é a parte mais interna do vegetal e caracteriza-se por ser menos permeável e mais duro que o alburno. Estas características devem-se ao depósito de substâncias e a ocorrência de tiloses que obstruem parcial ou totalmente a passagem de líquidos. A diferença de permeabilidade irá provocar um gradiente de umidade entre cerne e alburno, gerando o aparecimento de tensões internas no lenho. Quando estas tensões ultrapassam as tensões que a parede celular pode suportar, a madeira rompe-se, geralmente nas células parenquimáticas que possuem paredes finas e não lignificadas, provocando a abertura de trincas e fissuras que irão gerar maior porcentual de finos.

A leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) por ser uma madeira proveniente de um plantio jovem (seis anos), na qual ainda não havia ocorrido a formação de cerne apresentou os menores índices de finos.

Os resultados encontrados para as três espécies apresentam-se abaixo dos obtidos por COUTINHO<sup>14</sup> que utilizou *Eucalyptus saligna*, porém superiores aos dados encontrados para a madeira de *Eucalyptus grandis*, citados por OLIVEIRA et alii<sup>24</sup>.

A ANOVA do porcentual de finos abaixo de 12 mm pode ser observada no Quadro nº 54.

Quadro nº 54 - Análise de variância do percentual de finos abaixo de 12mm.

| -----             | ----- | -----  | -----  | -----     |
|-------------------|-------|--------|--------|-----------|
| FONTE DE VARIAÇÃO | G.L.  | S.Q.   | Q.M.   | F.        |
| -----             | ----- | -----  | -----  | -----     |
| Temperatura       | 3     | 1.5773 | 0.5258 | 42.9091*  |
| Espécie           | 2     | 4.3880 | 2.1940 | 179.1623* |
| Interação(E.T)    | 6     | 0.3722 | 0.0620 | 5.0627*   |
| (Tratamento)      | 11    | 6.3375 | 2.7818 | 227.0341* |
| Resíduo           | 24    | 0.2941 | 0.0225 |           |
| -----             | ----- | -----  | -----  | -----     |
| TOTAL             | 35    | 6.6316 | 2.7941 |           |
| -----             | ----- | -----  | -----  | -----     |

\* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade

As espécies, temperaturas e suas interações e os tratamentos apresentam significância na raiz quadrada do percentual de finos ao nível de 5 % de probabilidade.

Quadro nº 55 mostra a comparação das médias dos resultados obtidos para as três espécies nas temperaturas utilizadas.

Quadro nº 55 - Quadro comparativo de médias - Percentual de finos abaixo de 12mm.

| TEMPERATURAS | ESPÉCIES |             |         | Médias  |
|--------------|----------|-------------|---------|---------|
|              | Leucena  | Catingueira | Pereiro |         |
| °C           | %        | %           | %       | %       |
| -----        | -----    | -----       | -----   | -----   |
| 350          | 6.07 a   | 11.70 a     | 9.33 a  | 9.03 a  |
|              | A        | B           | C       |         |
| 450          | 7.33 b   | 14.37 b     | 11.93 b | 11.21 b |
|              | A        | B           | C       |         |
| 550          | 8.73 c   | 13.91 c     | 13.60 c | 12.08 b |
|              | A        | B           | C       |         |
| 750          | 7.33 b   | 10.20 d     | 9.32 a  | 8.95 a  |
|              | A        | B           | C       |         |
| -----        | -----    | -----       | -----   | -----   |
| Médias       | 7.37     | 12.55       | 11.05   |         |
|              | A        | B           | C       |         |
| -----        | -----    | -----       | -----   | -----   |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

A leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) foi a espécie que deu origem à um carvão que apresentou, dentro de uma média de quatro temperaturas, o menor porcentual de finos. Observa-se que entre as temperaturas de 450 °C e 550 °C são gerados os maiores percentuais de finos para todas as espécies, não havendo diferença significativa entre os resultados obtidos nestas temperaturas.

Nota-se que ao analisar-se as interações: espécie x temperatura, todas as espécies apresentam carvão com variação significativa no porcentual de finos abaixo de 12 mm com a elevação da temperatura de carbonização, exceto os finos do carvão de pereiro (*Aspidosperma pyriforme* Mart) que não apresentaram variações significativas, pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, nos resultados obtidos às temperaturas de 350 °C e 750 °C. Nota-se, ainda, que em todas as temperaturas de carbonização existe variação significativa nos resultados de finos abaixo de 12 mm obtidos para o carvão das três espécies.

A Figura nº 17 mostra a influência da temperatura de carbonização na friabilidade do carvão vegetal.

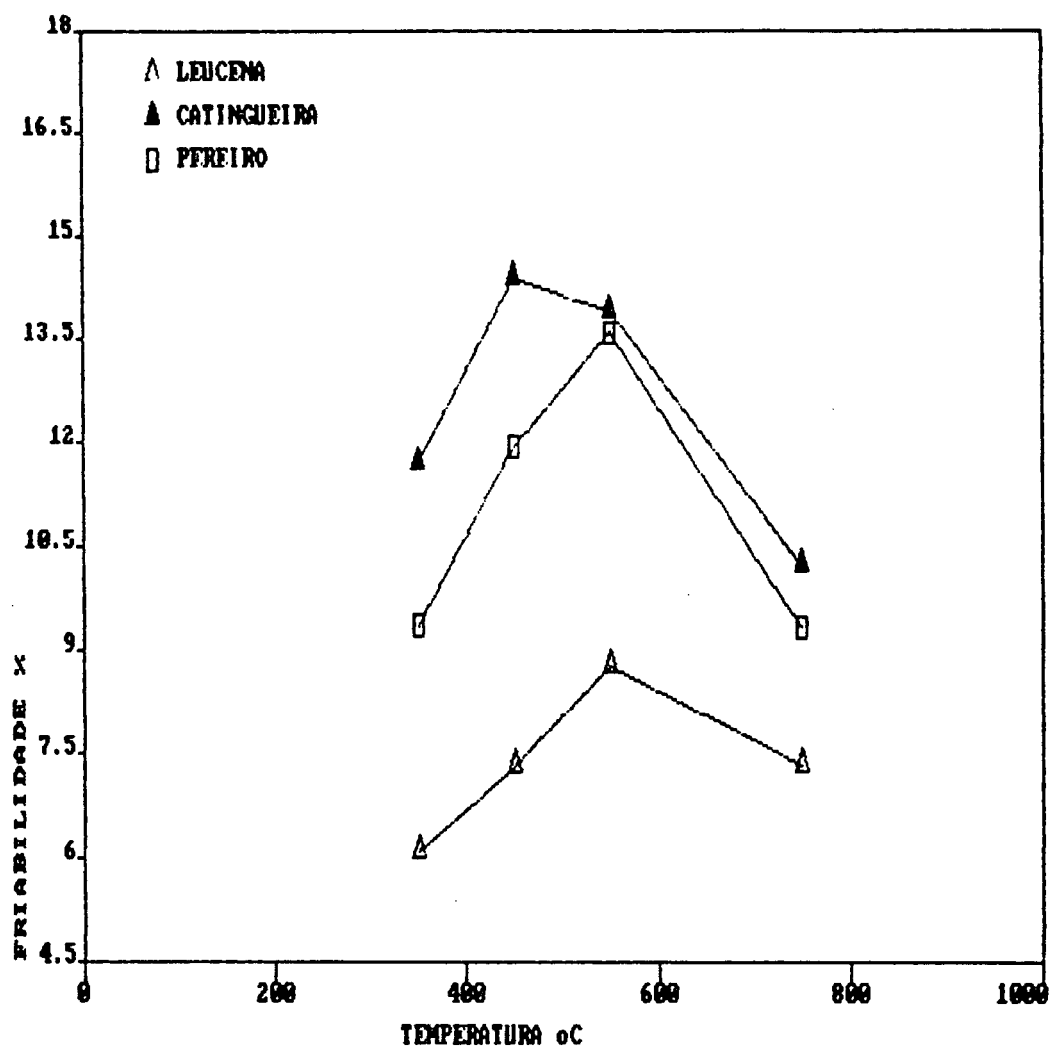


Figura nº 17 - Friabilidade do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização

#### 4.5. Densidade e teor de umidade do alcatrão insolúvel

No Quadro nº 56 nota-se que o teor de umidade do alcatrão insolúvel alcançou valores muito elevados, razão pela qual não foi possível a determinação do poder calorífico do mesmo. Estes altos teores de umidade obtidos sugerem a existência de alguma falha no sistema de separação do alcatrão insolúvel com o ácido pirolenhoso. O mesmo quadro apresenta a densidade do alcatrão variando em função da temperatura de carbonização e das espécies carbonizadas. Pode-se observar que os valores da densidade mantiveram-se praticamente constantes em função da temperatura de carbonização, variando somente em função das espécies.

Quadro nº 56 - Densidade a 25 °C e teor de umidade do alcatrão insolúvel

| Espécie     | Temperatura<br>°C | Densidade<br>g/cm <sup>3</sup> | Teor de Umidade<br>% |
|-------------|-------------------|--------------------------------|----------------------|
| Leucena     | 350               | 1,0852                         | 69,70                |
|             | 450               | 1,0861                         | 69,40                |
|             | 550               | 1,0824                         | 69,50                |
|             | 750               | 1,0792                         | 70,40                |
| Catingueira | 350               | 1,0818                         | 70,60                |
|             | 450               | 1,0934                         | 67,40                |
|             | 550               | 1,0934                         | 63,90                |
|             | 750               | 1,0931                         | 88,70                |
| Pereiro     | 350               | 1,0990                         | 61,80                |
|             | 450               | 1,0915                         | 61,80                |
|             | 550               | 1,0906                         | 64,60                |
|             | 750               | 1,0101                         | 60,30                |

#### 4.6. ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS TRÊS ESPÉCIES ESTUDADAS

A estimativa do potencial energético das três espécies estudadas não obedeceu nenhuma metodologia prescrita, sendo obtida simplesmente relacionando-se os dados da literatura com os dados obtidos na carbonização das três espécies.

Para obter-se esta estimativa realizou-se, inicialmente, a quantificação do material lenhoso disponível, em tonelada de madeira seca por hectare, tomando-se o volume de lenha seca por hectare para cada espécie, multiplicado pela sua respectiva massa específica aparente, conforme mostra o Quadro nº 57.

Quadro nº 57 - Quantificação do material seco disponível por hectare.

| ESPÉCIE     | VOL. LENHA/HA<br>VERDE<br>m <sup>3</sup> /ha | MASSA ESPECÍFICA<br>APARENTE<br>g/cm <sup>3</sup> | TEOR DE<br>UMIDADE<br>% | MATERIAL<br>SECO/HA<br>ton/ha |
|-------------|--|---|-------------------------|-------------------------------|
| Leucena     | 8.47*  | 0.69  | 63.60                   | 2.13                          |
| Catingueira | 5.46**                                       | 0.82  | 42.34                   | 2.58                          |
| Pereiro     | 4.60**                                       | 0.70  | 61.71                   | 1.23                          |

\* Dado baseado no IMA=2.42 m<sup>3</sup>/ha para espaçamento 3m x 2m, na região de Petrolina - PE<sup>NE</sup>, tendo em vista que o experimento implantado pela UFPB, no qual foi coletado o material utilizado neste trabalho, não possui controle dos dados dendrométricos da espécie leucena (*Leucaena leucocephala* Lam).

\*\* Dados baseados em inventário florestal realizado pela SUDENE nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba<sup>OP</sup>.

Após este procedimento, calculou-se o rendimento gravimétrico por hectare para cada espécie, tomando-se o rendimento do carvão obtido em cada uma das quatro temperaturas de carbonização multiplicado pela lenha disponível por hectare na região semi-árida. Estes resultados foram multiplicados pelo poder calorífico referente à cada espécie e temperatura de carbonização utilizada, fornecendo, então, a quantidade de energia contida no carvão vegetal. Considerando-se o poder calorífico do petróleo = 10.800 kcal/kg<sup>90</sup>, obteve-se o equivalente em tonelada de petróleo por hectare para cada espécie, nas quatro temperaturas de carbonização utilizadas. Estes resultados estão apresentados no Quadro nº 58.

Quadro nº 58 - Potencial energético das três espécies estudadas para a região semi-árida do Nordeste do Brasil.

| ESPÉCIE | TEMP.<br>°C | MADEIRA<br>POR HA<br>t/ha | CARVÃO<br>POR HA<br>t/ha | QUANT. ENERGIA<br>CONTIDA CARVÃO<br>kcal/ha | EQUIV.<br>TEP/ha |
|---------|-------------|---------------------------|--------------------------|---|------------------|
| Leuc.   | 350         | 2.13                      | 0.85                     | 5.74 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.62             |
|         | 450         | 2.13                      | 0.76                     | 5.47 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.59             |
|         | 550         | 2.13                      | 0.70                     | 5.11 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.55             |
|         | 750         | 2.13                      | 0.65                     | 4.65 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.50             |
|         | Média       | 2.13                      | 0.74                     | 5.24 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.57             |
| Cati.   | 350         | 2.58                      | 1.09                     | 6.60 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.71             |
|         | 450         | 2.58                      | 1.03                     | 6.60 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.71             |
|         | 550         | 2.58                      | 0.95                     | 6.45 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.70             |
|         | 750         | 2.58                      | 0.86                     | 5.64 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.61             |
|         | Média       | 2.58                      | 0.98                     | 6.32 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.68             |
| Pere.   | 350         | 1.23                      | 0.47                     | 2.93 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.32             |
|         | 450         | 1.23                      | 0.43                     | 2.76 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.30             |
|         | 550         | 1.23                      | 0.41                     | 2.71 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.29             |
|         | 750         | 1.23                      | 0.36                     | 2.34 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.25             |
|         | Média       | 1.23                      | 0.42                     | 2.68 . 10 <sup>6</sup>                      | 0.29             |



Pode-se observar no Quadro nº 58 e na Figura nº 18 que a espécie catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) possui o maior potencial energético em carvão vegetal entre as três espécies estudadas.

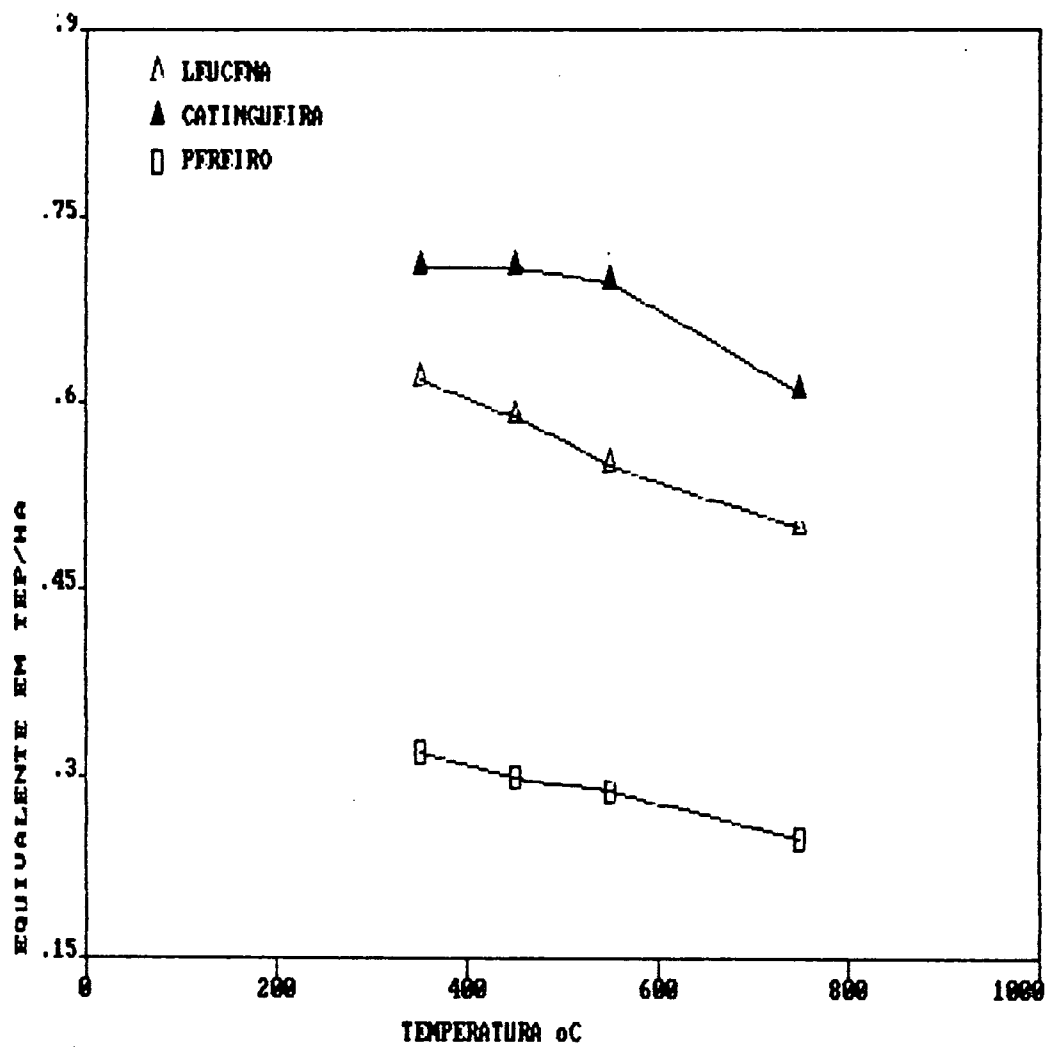


Figura n º 18 - Equivalente em tonelada de petróleo

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

1. Os valores de massa específica aparente de 0,82 g/cm<sup>3</sup>, 0,70 g/cm<sup>3</sup> e 0,69 g/cm<sup>3</sup> das madeiras da catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul), do pereiro (*Aspidosperma pyriforme* Mart) e da leucena (*Leucaena leucocephala* Lam), respectivamente, demonstram que estas espécies apresentam potencial para a transformação em carvão vegetal, pois situam-se dentro da média dos valores de massa específica aparente de madeiras destinadas à produção de carvão vegetal no Brasil.

2. Os resultados experimentais demonstram que o rendimento gravimétrico do carvão vegetal obtido com a carbonização de cada uma das espécies testadas sofreu influência da temperatura de carbonização, ocorrendo uma diminuição no rendimento em carvão com a elevação da temperatura de carbonização.

A espécie catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) apresentou os maiores rendimentos em carvão nas quatro temperaturas, em média 37.14 %, seguida da leucena (*Leucaena leucocephala* Lam), média de 34.88 %, e do pereiro (*Aspidosperma pyriforme* Mart) com uma média de 33.97 %.

3. Nas condições de carbonização utilizadas, os rendimentos em líquido pirolenhoso não foram afetados pela temperatura de carbonização e pelas espécies, contrariando os dados apresentados

pela literatura que afirmam que a temperatura de carbonização influencia os resultados de rendimento em líquido pirolenhoso.

4. O rendimento em gás não condensável sofreu influência apenas da temperatura de carbonização, não sendo influenciado pela espécie vegetal carbonizada. O efeito da temperatura de carbonização é notado, principalmente, nas temperaturas de 450 e 550 °C, entre as quais ocorre um brusco aumento no rendimento em gás não condensável.

5. Os rendimentos em alcatrão insolúvel não apresentaram variação significativa com a elevação da temperatura de carbonização, contrariando a teoria apresentada pela literatura que afirma que a temperatura de carbonização influencia os rendimentos do alcatrão insolúvel. Os rendimentos em alcatrão foram sensivelmente afetados pela espécie testada.

Recomenda-se avaliações mais precisas no futuro, no sentido de observar o efeito da temperatura nos rendimentos em alcatrão e, também, suas propriedades.

6. As três espécies apresentaram um aumento no teor de carbono total e carbono fixo com a elevação da temperatura de carbonização. O aumento do teor de carbono fixo é mais acentuado entre as temperaturas de 350 e 450 °C. As médias do teor de carbono fixo de 75.57 %, 71.53 % e 69.42 %, encontradas para as espécies leucena (*Leucaena leucocephala* Lam), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart), respec-

tivamente, encontram-se dentro da média do teor de carbono fixo do carvão vegetal utilizado pelas usinas siderúrgicas do maior produtor e consumidor de carvão do país: o Estado de Minas Gerais.

7. O teor de cinzas do carvão vegetal demonstrou ser influenciado pela temperatura de carbonização e, principalmente, pela espécie que foi transformada em carvão vegetal.

Os valores encontrados para as três espécies são considerados elevados. Este fato pode ser atribuído à características inerentes as espécies utilizadas (composição química) e, também, aos solos da região semi-árida, ricos em cálcio e potássio.

Recomenda-se estudos mais aprofundados com um maior número de repetições na determinação do teor de cinzas do carvão vegetal das três espécies estudadas.

8. Os resultados de poder calorífico do carvão vegetal só foram influenciados pela espécie que deu origem ao carvão vegetal, não apresentando variação significativa com a elevação da temperatura de carbonização, contrariando as citações da literatura.

O carvão vegetal que apresentou os maiores índices de poder calorífico foi o originado da espécie leucena (*Leucaena leucocephala* Lam).

9. A temperatura de carbonização influenciou no comportamento da densidade aparente do carvão vegetal ocorrendo uma elevação desta entre as temperaturas de 450 °C e 550 °C.

A densidade verdadeira sofreu um acréscimo com o aumento da temperatura de carbonização .

A catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) apresentou os maiores índices de densidade verdadeira e aparente do carvão que são consequentes do fato da espécie possuir a maior massa específica aparente da madeira.

10. As três espécies demonstraram ter comportamento similar no teste de tamboramento, ocorrendo um acréscimo no percentual de finos entre as temperaturas de 450 e 550 °C.

A leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) apresentou os menores percentuais de finos, com uma geração de finos média de 7,37 % abaixo de 12mm.

Recomenda-se estudos posteriores sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de finos na região nordeste do Brasil.

11. A estimativa do potencial energético em tonelada equivalente de petróleo (TEP) foi de 0,57 TEP para a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) ; 0,68 TEP para a catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e 0,29 para o pereiro (*Aspidosperma pyriforme* Mart).

Devido à falta de informações e, também, pela carência de dados fidedignos na literatura, recomenda-se a realização de inventários florestais na região semi-árida, para o fortalecimento

do embasamento florestal de futuros trabalhos que permitam uma estimativa mais precisa do potencial de utilização da caatinga.

12. Para as condições que foram realizadas as carbonizações a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) apresentou as melhores propriedades entre as três espécies testadas: maiores teores de carbono total e carbono fixo, menor teor de cinzas e friabilidade e maior poder calorífico.

13. Em termos gerais, pelas características físicas e químicas resultantes dos testes realizados, as três espécies demonstram possuir grande potencial de utilização para fins energéticos, porém apresentam como restrição para aplicação em processos siderúrgicos o alto teor de cinzas encontrado para o carvão das espécies catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) e pereiro (*Aspidosperma pyriforme* Mart) que situam-se na faixa de 7,73 e 8,86 %. Estes resultados são superiores aos valores da média dos carvões vegetais aplicados na siderurgia brasileira que situam-se entre 3 a 5 % de cinzas.

14. Tendo em vista que as aplicações das três espécies são pouco conhecidas, recomenda-se maiores estudos sobre as utilizações das três essências para fins tecnológicos ( papel, fins estruturais, móveis). Para tanto, recomenda-se que, inicialmente, sejam realizadas pesquisas aprofundadas referentes à aspectos silviculturais inerentes à cada espécie.

15. A viabilidade da realização de melhoramento genético, principalmente, com a espécie leucena (*Leucaena leucocephala* Lam), deve ser estudada e analisada, tendo em vista que os exemplares da essência que existem no país restringem a sua utilização, devido ao aspecto de seus fustes que apresentam, com grande frequência, grã irregular, tortuosidades e muitas ramificações; e, em seu país de origem a leucena (*Leucaena leucocephala* Lam) não apresenta estes problemas tão acentuadamente.



## SUMMARY

The type of vegetation found in the semi-arid zone of northeastern region of Brazil is called "caatinga". It's utilization is very restricted mainly due to the reduced size and the form of the trees.

This study was carried out to determined the potencial and properties of the charcoal produced bored in wood from three species of the "caatinga": *Leucaena leucocephala* Lam (leucena); *Caesalpinia pyramidalis* Tul (catingueira) and *Aspidosperma pyriformium* Mart (pereiro).

A laboratory electrical retort was used. Charcoal was produced at temperatures of 350, 450, 550 and 750 °C. The retort was heated at a rate of 0,625 °C/min.

The following properties were determined: yield (charcoal, condensed portion, non condensable gazes and tar); chemical properties (elementary analysis, fixed carbon, volatile materials, ash contend, ash analysis and superior calorific value) and physicals properties (specific gravity, porosity and charcoal powdery).

Yield was found to be hight, and as expected, decreased with temperatura. The temperature of carbonization did not affected the yield in condensed liquid and tar, as well as the

calorific value. All the chemical properties of the charcoal were affected by the temperature. Fixed carbon and ash content increased with the temperature. Ash content of the charcoal produced from the three species was very high, it varied between 7,7 and 8,8 %.

Considering the chemical properties the best results were obtained with charcoal produced from *Leucaena leucocephala* Lam.

Based on the results of this research and on available data of forest inventory it is estimated that *Caesalpinia pyramidalis* Tul when transformed into charcoal can produce 0,68 ETO/ha (equivalent tons of oil). *Leucaena leucocephala* Lam potential is estimated to be 0,57 ETO/ha, and *Aspidosperma pyriforme* Mart 0,29 ETO/ha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. ALMEIDA, J.M. Efeito da temperatura sobre rendimentos e propriedades dos produtos da carbonização de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Viçosa, 1983. 40p. Dissertação, Master Science, Universidade Federal de Viçosa.
02. ALMEIDA, M.R. & REZENDE, M.E. O processo de carbonização contínua da madeira. In: CETEC. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte, 1982. p.142-156. (SPT 008).
03. ASSIS, P.S. et alii. Utilização do carvão vegetal na siderurgia. In: CETEC. Produção e utilização do carvão vegetal. Belo Horizonte, 1982. p. 279-318. (SPT 008).
04. BARBOSA, J.A. Avaliação qualitativa e quantitativa do carvão e condensados produzidos na carbonização da madeira de algaroba (*Prosopis juliflora* D.C.). Viçosa, 1986. 52p. Dissertação, Master Science, Universidade Federal de Viçosa.
05. BRAGA, R. Plantas do Nordeste, especialmente do Ceará. 3a.ed. Fortaleza, Escola Superior de Mossoró, 1976, 540p.
06. BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Brasília, 1987. 153p.
07. BRITO, J.O. & BARRICHELO, L.E. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. IPEF. Piracicaba, (14):9-20, jul.1977.
08. BRITO, J.O. & NUCCI, O.DE. Estudo tecnológico da madeira de *Pinus* spp para a produção de carvão vegetal e briquetagem. IPEF. Piracicaba, abr.1984. p. 25-30.
09. CARVALHO, G.H. Inventário florestal na Paraíba e no Rio Grande do Norte, III contribuição para a determinação da reserva madeireira da bacia do Rio Piranhas-Açu. Sudene. Recife, 1975. 131p. (Série Recursos Vegetais n. 03).
10. CASTRO, P.F. Obtenção de alcatrão vegetal em fornos de alvenaria. In: CETEC. Produção e utilização do carvão vegetal. Belo Horizonte, 1982. p.189 -196. (SPT - 008).

11. COUTINHO, A.R. **Qualidade do carvão vegetal correlacionada com as características da madeira de Eucalyptus saligna e temperatura de carbonização.** Piracicaba, 1984. 76p. Dissertação, Master Science, Universidade Federal de Viçosa.
12. CUNHA, L.S. **Leucaena: A árvore milagrosa de grande futuro energético para o Brasil.** *Jornal dos Reflorestadores*, São Paulo, 1(4):17-19. 1979.
13. DUQUE, J.G. **Solo e água no polígono das secas.** 5a. ed. Mossoró, 1980.
14. DISCACCIATI, P.R. **Uso do alcatrão em fornos siderúrgicos.** Belo Horizonte, 120 p. Dissertação, Master Science, Universidade Federal de Minas Gerais.
15. FARIA, W.L. **A jurema preta (Mimosa hostilis, Benth) como fonte energética do semi-árido do Nordeste - Carvão.** Curitiba, 1984. 113p. Dissertação, Master Science, Universidade Federal do Paraná.
16. FERREIRA, L.M.H.C. **Desenvolvimento de uma retorta para carbonização de madeira.** Viçosa, 1988. 48 p. Dissertação, Master Science, Universidade Federal de Viçosa.
17. FOREST PRODUCTS LABORATORY . **Charcoal, production, marketing and use.** Madison, 1961. 137p.
18. GOLDSTEIN, I.S. **Wood as a source of chemical feedstocks.** *AIChE Symposium Series*, 74(177):111-114, 1978.
19. GOMES, P.A. & OLIVEIRA, J.B. **Teoria da carbonização da madeira.** In: CETEC. **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte, 1980. p. 27-41. (SPT 001).
20. JUVILLAR, J.B. **Tecnologia de transformação da madeira em carvão.** In: CETEC. **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte, 1980. (SPT 001).
21. ----- . **Carvoejamento da madeira e seus reflexos na qualidade de carvão : qualidade da madeira.** *Jornal dos Reflorestadores*, 1(8):17. 1980.
22. LIMA, P.C. **Comportamento de Leucaena leucocephala (Lam) de Wit. comparado com Prosopis juliflora (SW)DC e Eucalyptus alba Reinw ex Blume em Petrolina (Pe), região semi-árida do Brasil.** Curitiba, 1982. 96p. Dissertação, Master Science, Universidade Federal do Paraná.

23. LUETZELBURG, P. **Estudo Botânico do Nordeste**. Rio de Janeiro, R.J. Ministério da Viação e Obras Públicas, 1922-1923. (Pub. nº 57, série I.A.)
24. MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: CETEC. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, 1980. p. 11-26. (SPT 001).
25. MATOS, M. et alii. Características dos produtos da carbonização da madeira. In: CETEC. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1981. p.35-43. (SPT 004).
26. MCGINNES, E.A. Some structural changes observed in the transformation of wood into charcoal. *Wood and Fiber*. v.03, n.2, 1971, p.77-83.
27. MENDES, B.V. **Alternativas tecnológicas para a agropecuária do Semi-Árido**. São Paulo, 1985. Coleção Mossoroense, 266. 171 p.
28. MENDES, M.G.; GOMES, P.A. & OLIVEIRA, J.B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: CETEC. **Produção e utilidade do carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p. 75-90. (SPT 008).
29. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. **Leucaena: Promising forage and three crop for the tropics**. Washington, D.C., 1977. 115p. ilustr.
30. OLIVEIRA, J.B. et alii. Estudos preliminares de normalização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal. In: CETEC. **Carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.7-38. (SPT 006).
31. ----- . Propriedades do carvão. In: CETEC. **Carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.39-61. (SPT 006).
32. ----- . Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: CETEC. **Carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.63-102. (SPT 006).
33. ----- . Otimização do processo de carbonização da madeira e do coco babaçu em fornos de alvenaria. In: CETEC. **Carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.103-130. (SPT 006).
34. ----- . Produção de carvão vegetal, aspecto técnico. In: CETEC. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.59-74. (SPT 008).

35. OLIVEIRA, L.T. & ALMEIDA, M.R. Controle e qualidade de carvão vegetal. In: ABM. Carvão e coque aplicados à metalurgia. Belo Horizonte, 1979. 48p.
36. ----- . Avaliação de carvão vegetal. In: CETEC. Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, 1980. p.43-54. (SPT 001).
37. PAULA, J.E. & ALVES, J.L.H. Estudo das estruturas anatômicas e, de algumas propriedades físicas de 14 espécies ocorrentes em áreas de caatinga. Brasil Florestal, 12 (43) : 47 - 58. 1980.
38. PERES, L.S. Influência da temperatura de pirólise nas características do carvão vegetal. R. Pernambucano de Tecnologia, Recife, 1(1):57-66, set/dez. 1981.
39. PIRES, J.G. & FERREIRA, C.A. Potencialidade do Nordeste do Brasil para reflorestamento. EMBRAPA. Petrolina, 1982. 30p. (Circular técnica n. 6)
40. REZENDE, M.E. Calor de reação de pirólise da madeira. Aplicação aos balanços de massa e energia da carbonização contínua. Belo Horizonte, 1983. 154 p. Dissertação, Master Science, Universidade Federal de Minas Gerais.
41. RIBEIRO, J.H. Uma alfafa ao alcance de todos. In: Globo rural. 13:20-29, out. 1981.
42. SILVA, J.O. Características dendrológicas e anatômicas da madeira de dez espécies ocorrentes no Nordeste semi-árido. Viçosa, 1988. p. . Dissertação, Master Science, Universidade Federal de Viçosa.
43. STAMM, A.J. & HARRIS, E.E. Destructive distillation of wood. New York, Chemical Publishing, 1953. p.440-468.
44. UHART, E. A floresta amazônica: Fonte de energia. Belém, SUDAM, 1976. 144p.
45. VALENTE, O.F. & LELLES, A.R. Carbonização da madeira. In: ABM. Carvão e coque aplicados à metalurgia, 2a.ed. São Paulo, 1:85-151.
46. VALENTE, O.F. & VITAL, B.L. A densidade da madeira e a produtividade em carvão vegetal. Informativo SIF, Viçosa, 01:p.1-6, mai.1985.
47. VEADO, J.T. Perspectivas para a siderurgia a carvão vegetal. In: XXXI Congresso da ABM. Belo Horizonte, 1976. 61p.

48. WENZEL, H.F.J. *The chemical technology of wood*. Academic Press, New York, 1970. 692 p.
49. WISE, et alii. *Wood chemistry*. American Chemical Society, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1952.
50. YOKOYA, N. & MATSUZAKI, H. Queimadores de pó a carvão vegetal. In: CETEC. *Produção e utilização de carvão vegetal*. Belo Horizonte, 1982. p.208-214. (SPT 008).