

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA PARA
PRODUÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO**

Artur Tôres Filho

N.Cham 628 T693v 2005

Autor: Tôres Filho, Artur.

Título: Viabilidade técnica e ambiental



115840804

Ac. 434068

**Belo Horizonte
2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

**VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA PARA
PRODUÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO**

Artur Tôrres Filho

**Belo Horizonte
2005**

LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

**VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA PARA
PRODUÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO**

Artur Tôrres Filho

Artur Tôres Filho

028
75354
0305

DIREITO AUTORAL
Este arquivo é reservado e protegido
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sob quaisquer meios
eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Caldeira Bandeira de Melo

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos

Escola de Engenharia

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

U.F.M.G. - BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA



115840804

NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

AC 434068

LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

T693v Tôrres Filho, Artur
Viabilidade técnica e ambiental da utilização de resíduos de madeira para a produção
de um combustível alternativo [manuscrito] / Artur Tôrres Filho – 2005.
108 f. , enc. : il.

Orientador: Gilberto Caldeira Bandeira de Melo

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de
Engenharia Sanitária e Ambiental.

Bibliografia: f. 105-108

1. Resíduos de madeira como combustível – Teses. 2. Meio ambiente – Teses. I.
Melo, Gilberto Caldeira Bandeira de. II. Universidade Federal de Minas Gerais,
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

CDU: 662.638 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Av. Contorno 842 – 7º andar 30110-060 Belo Horizonte – BRASIL

Tel: 55 (31) 3238-1882 Fax: 55 (31) 3238-1882 posgrad@desa.ufmg.br

www.smarh.eng.ufmg.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Viabilidade Técnica e Ambiental da Utilização de Resíduos de Madeira para a
Produção de um Combustível Alternativo

ARTUR TORRES FILHO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:



Prof. GILBERTO CALDEIRA BANDEIRA DE MELO


Profa LISÉTE CELINA LANGE

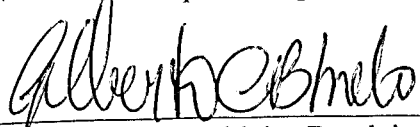

Prof. ROBSON JOSÉ DE CASSIA FRANCO AFONSO


Prof. WILFRID KELLER SCHWABE

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH


Profª Mônica Maria Diniz Leão
Coordenadora

Versão Final aprovada por


Prof. Gilberto Caldeira Bandeira de Melo
Orientador

Belo Horizonte, 25 de fevereiro de 2005.

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este trabalho não pode ser reproduzido ou
transmitido, sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

DEDICATÓRIA

À memória de Arthur Tôres, exemplo de generosidade e confiança no ser humano.

LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Gilberto pela orientação, apoio e pelas imprescindíveis correções de rumo, sem as quais não seria possível desenvolver este trabalho com o mesmo aprofundamento;

Aos sócios da empresa Engenho Nove, André Luiz e José Andrade, por abraçarem este projeto e pelo fornecimento da estrutura física e recursos necessários para a pesquisa;

Aos parceiros da SEGMA, Luciano, Rodrigo, Gustavo e Nilson pelo rigor técnico nas medições e disponibilização da equipe técnica, equipamentos de campo e laboratório;

Às empresas FITED e Padaria São Geraldo, pela disponibilização das estruturas de produção;

Aos colegas da Engenho Nove, Paulo Roberto, Fernanda, Élyda, Miriam, Pedro, Agnaldo, Demétrio, Antônio Pedro, Érica, Fátima, João Luiz e Kenso, por todo o apoio e colaboração;

A Érica, Patrícia e Lorena pelos conhecimentos de informática e normalização que conferiram toda a estrutura para publicação da dissertação;

Aos técnicos da SMLU – Secretaria Municipal de Limpeza Urbana, Heuder e Max, pela disponibilização dos dados e toda a estrutura do Aterro Sanitário de Belo Horizonte;

Aos técnicos do CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Gisele e Fernando, pelo empenho e esclarecimentos sobre as metodologias de realização das análises;

Às técnicas do IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológico do Estado de São Paulo, Lígia e Heloísa, pelo profissionalismo e interesse nos serviços prestados;

Aos meus pais, Grace e Arthur, por minha formação e pelo exemplo de vida;

À minha esposa Patrícia, pelo companheirismo, confiança e compreensão no dia a dia;

Aos meus filhos, Vítor, Guilherme e Eduardo, fontes de combustível para minha existência.

LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

"Triste não é mudar de idéia. Triste é não ter idéia
para mudar."

Francis Bacon

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 - Contextualização | 1 |
| 1.2 - Utilização de fontes de energia | 2 |
| 1.3 - Justificativas | 6 |
| 2 - OBJETIVOS | 7 |
| 2.1 - Objetivo Geral | 7 |
| 2.2 - Objetivos específicos | 7 |
| 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| 3.1 - Características dos resíduos de madeira e fontes potenciais de geração | 8 |
| 3.2 - Influência das reações de pirólise e carbonização no poder calorífico da madeira e seus derivados | 16 |
| 3.3 - Torrefação da madeira e derivados | 30 |
| 3.4 - Adaptação de fornalhas para utilização de combustíveis alternativos derivados de madeira | 36 |
| 3.5 - Impactos ambientais associados à combustão dos derivados de madeira | 41 |
| 4 - METODOLOGIA | 56 |
| 4.1 - Considerações Gerais | 56 |
| 4.2 - Estratégia de desenvolvimento dos trabalhos | 57 |
| 4.3 - Preparo do material lenhoso - tratamento mecânico dos resíduos | 58 |
| 4.4 - Primeira fase do experimento - ensaios de laboratório | 59 |
| 4.5 - Tratamento térmico em forno rotativo - ensaios em escala real | 65 |
| 4.6 - Teste de queima em fornalha - campanhas de amostragens isocinéticas | 69 |

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998. **i**
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sem a qualificação dos meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros. **iii**

iv

| | |
|---|-----|
| 5 – RESULTADOS | 72 |
| 5.1 - Ensaio em escala laboratorial | 72 |
| 5.1.1 - Determinação do poder calorífico superior e inferior em cadinho aberto – tratamento térmico em mufla | 72 |
| 5.1.2 - Determinação do poder calorífico superior e inferior em cadinho fechado com tampa – tratamento térmico em mufla | 77 |
| 5.2 - Ensaio em escala industrial | 82 |
| 5.3 - Campanhas de amostragem isocinéticas | 84 |
| | |
| 6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 87 |
| 6.1 - Potencial para aplicação do produto e adaptação de fornalhas | 88 |
| 6.2 - Análise comparativa entre os resultados obtidos nos experimentos em escala laboratorial, escala industrial e na literatura consultada | 92 |
| 6.3 - Análise comparativa da performance dos combustíveis nos testes de queima e campanhas de amostragens isocinéticas | 96 |
| | |
| 7 – CONCLUSÕES | 101 |
| | |
| 8 – RECOMENDAÇÕES | 103 |
| | |
| 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 104 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
cal/g – caloria por grama
CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CFC – Clorofluorcarbono
CH₄ – metano
CO - monóxido de carbono
CO₂ - dióxido de carbono
COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
DN - Deliberação Normativa
FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente
FET – Fator de equivalência de toxicidade
ha – hectare
IPT- Instituto de Pesquisa Tecnológico do Estado de São Paulo
kcal/kg - quilocaloria por quilograma
kcal/m³ - quilocaloria por metro cúbico
kcal/Nm³ - quilocaloria por normal metro cúbico
kg - quilograma
kgf/cm² - quilograma força por centímetro quadrado
kg/m³ - quilograma por metro cúbico
m² - metro quadrado
m/s – metros por segundo
MDF – médium density fibreboards
mg/Nm³ - miligrama por normal metro cúbico
NBR – Norma Brasileira Registrada
NO_x - óxidos de nitrogênio
NO₂ - dióxido de nitrogênio
NO - óxido de nitrogênio
NTO/CCMS – North Treaty Organization's – Comitee on Challenges of Modern Society
O₃ - ozônio
PCDD/F – dibenzo-p-dioxinas policloradas e dibenzofuranos policlorados
PCI - Poder Calorífico Inferior

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

PCS - Poder Calorífico Superior

SINDUSCON - Sindicato da Industria da Construção Civil

SMLU – Secretaria Municipal de Limpeza Urbana

SO₂ - dióxido de enxofre

tep - tonelada equivalente de petróleo

LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Oferta interna de energia no Brasil em 2002 | 3 |
| Figura 1.2 - Oferta interna de energia no mundo em 2000 | 3 |
| Figura 1.3 - Estrutura da oferta interna de energia (%) no Brasil, nos países da OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) e no mundo | 4 |
| Figura 3.1 - Resíduos de poda de árvores | 13 |
| Figura 3.2 - Resíduos de construção civil | 14 |
| Figura 3.3 - Análise termogravimétrica da madeira e de seus componentes | 20 |
| Figura 3.4 - Variação do poder calorífico em função do teor de carbono fixo | 27 |
| Figura 3.5 - Variação do poder calorífico em função do teor de cinzas | 27 |
| Figura 3.6 - Variação do poder calorífico em função do teor de cinzas + materiais voláteis | 28 |
| Figura 3.7 - Variação do PCS em função da temperatura de carbonização | 30 |
| Figura 3.8 - Aparato experimental para teste de combustão | 48 |
| Figura 3.9 - Características da combustão em função do tempo de queima | 49 |
| Figura 4.1 - Picador de toras utilizado para a fragmentação do material | 56 |
| Figura 4.2 - Fluxograma da estratégia de desenvolvimento dos trabalhos | 58 |
| Figura 4.3 - Calorímetro adiabático utilizado na determinação do poder calorífico | 61 |
| Figura 4.4 - Analisador CNHS | 61 |
| Figura 4.5 - Amostras após tratamento térmico | 62 |
| Figura 4.6 - Forno cilíndrico rotativo – vista 1 | 66 |
| Figura 4.7 - Forno cilíndrico rotativo – vista 2 | 66 |
| Figura 4.8 - Peneira ventilada | 67 |
| Figura 4.9 - Cavaco cru (a esquerda) e cavaco após tratamento térmico | 69 |
| Figura 6.1 - Comparação qualitativa entre a taxa de energia fornecida pela combustão da lenha e a demandada para produção de vapor | 90 |
| Figura 6.2 - Forno da unidade de panificação queimando lenha | 96 |
| Figura 6.3 - Forno da unidade de panificação queimando cavaco | 97 |
| Figura 6.4 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com cavaco torrado | 98 |
| Figura 6.5 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com cavaco cru | 99 |
| Figura 6.6 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com lenha | 99 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 - Composição elementar da madeira | 10 |
| Tabela 3.2 - Proporção dos diversos componentes da madeira segundo diversos autores | 11 |
| Tabela 3.3 - Razão da absorção da radiação de calor entre os principais gases responsáveis pelo efeito estufa e o dióxido de carbono (CO ₂) | 12 |
| Tabela 3.4 - Produção de fitomassa em duas culturas de eucalipto | 12 |
| Tabela 3.5 - Percentual do calor absorvido na fornalha em relação ao calor desenvolvido na combustão (rendimento térmico percentual) | 17 |
| Tabela 3.6 - Poder calorífico superior - PCS e inferior - PCI da lenha em função da umidade | 17 |
| Tabela 3.7 - Evolução da carbonização da madeira em função do aumento das temperaturas | 23 |
| Tabela 3.8 - Variação da composição elementar e rendimento do processo de carbonização em função da temperatura | 23 |
| Tabela 3.9 - Rendimento percentual em massa de processos de carbonização | 24 |
| Tabela 3.10 - Poder calorífico inferior de produtos utilizados como combustíveis sólidos | 25 |
| Tabela 3.11 - Valores de A, em função da relação $\frac{V}{V+C}$ | 26 |
| Tabela 3.12 - Poder calorífico do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização* | 29 |
| Tabela 3.13 - PCS calculado a partir da análise elementar do carvão e da equação (3.3) | 29 |
| Tabela 3.14 - Características da madeira após torrefação | 32 |
| Tabela 3.15 - Características da madeira torrada | 34 |
| Tabela 3.16 - Influência do tempo de processamento na torrefação da madeira | 34 |
| Tabela 3.17 - Poluentes atmosféricos e principais consequências associadas | 45 |
| Tabela 3.18 - Características do produto obtido com o processo de torrefação de madeira em comparação com a madeira seca ao ar e carvão vegetal (base úmida) | 46 |
| Tabela 3.19 - Composição elementar do produto obtido com o processo de torrefação da madeira em comparação com a madeira seca ao ar e carvão vegetal | 47 |
| Tabela 3.20 - Rendimento em massa e energia do processo de torrefação em cavacos de madeira e briquetes de serragem | 47 |
| Tabela 3.21 - Emissão de fumaça dos diferentes combustíveis no teste de queima | 50 |
| Tabela 3.22 - Combustíveis utilizados nas avaliações e campanhas de amostragem | 51 |
| Tabela 3.23 - Análises dos gases das misturas de combustíveis | 52 |

| | |
|---|----|
| Tabela 3.24 - Concentração de dioxinas e furanos no fluxo gasoso proveniente da queima de diversas proporções de mistura de combustíveis | 52 |
| Tabela 3.25 - Concentração de metais nas emissões provenientes da queima de diversas misturas de combustíveis | 53 |
| Tabela 3.26 - Concentração de metais nas cinzas provenientes da queima de diversas misturas de combustíveis | 54 |
| Tabela 3.27 - Concentração de metais na fuligem proveniente da queima de diversas misturas de combustíveis | 54 |
| Tabela 5.1 - Planilha para determinação do poder calorífico inferior e superior - tratamento térmico em mufla com cadinho aberto | 73 |
| Tabela 5.2 - Planilha para determinação do teor de enxofre na amostra (S) - tratamento térmico em mufla com cadinho aberto | 75 |
| Tabela 5.3 - Planilha para Determinação do teor de carbono, nitrogênio e hidrogênio - Método Aparelho C.H.N. - tratamento em mufla com cadinho aberto | 76 |
| Tabela 5.4 - Planilha de determinação do PCI e PCS - tratamento térmico em mufla com cadinho fechado | 77 |
| Tabela 5.5 - Planilha para determinação do teor de enxofre na amostra - tratamento térmico em mufla com cadino fechado | 79 |
| Tabela 5.6 - Planilha para determinação do teor de carbono, nitrogênio e hidrogênio - Método Aparelho C.H.N. tratamento térmico em mufla cadinho fechado | 80 |
| Tabela 5.7 - Perda de massa nos tratamentos térmicos em laboratório a diversas temperaturas com cadinho sem tampa | 81 |
| Tabela 5.8 - Perda de massa nos tratamentos térmicos em laboratório a diversas temperaturas com cadinho fechado (com tampa) e ganho de umidade após 24, 48 e 72 horas | 81 |
| Tabela 5.9 - Percentual de umidade, enxofre, hidrogênio em cavacos de madeira submetidos a tratamento térmico em forno rotativo em diversas faixas de temperatura | 82 |
| Tabela 5.10 - Poder calorífico superior e inferior em cavacos de madeira submetidos a tratamento térmico em forno rotativo em diversas faixas de temperatura | 83 |
| Tabela 5.11 - Resultados obtidos em amostragem isocinética nos gases de exaustão na chaminé de uma fornalha queimando lenha | 84 |
| Tabela 5.12 - Resultados obtidos em amostragem isocinética nos gases de exaustão na chaminé de uma fornalha queimando cavaco tratado a 160 – 180° C | 84 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 5.13 - Resultados obtidos em amostragem isocinética nos gases de exaustão na chaminé de uma fornalha queimando cavaco torrado | 85 |
| Tabela 5.14 - Composição volumétrica dos gases – Medições realizadas durante as amostragens isocinéticas com ORSAT | 85 |
| Tabela 5.15 - Planilha para determinação do consumo de combustível em fornalha durante teste de queima para avaliação de combustíveis diversos | 85 |
| Tabela 5.16 - Planilha para determinação de perda de massa nos diversos tratamentos em forno rotativo e rendimento energético* | 86 |
| Tabela 6.1 - Valores de PCI em kcal/kg, de produtos obtidos com a torrefação da madeira em diversas temperaturas e tempos de processamento - Comparativo entre o ensaio em escala real e a bibliografia | 93 |
| Tabela 6.2 - Comparativo do poder calorífico superior e inferior nos experimentos conduzidos em laboratório com cadinho aberto (sem tampa) e em escala real (forno rotativo) | 94 |
| Tabela 6.3 - Comparativo do poder calorífico superior e inferior nos experimentos conduzidos em laboratório com cadinho fechado (com tampa) e em escala real (forno rotativo) | 95 |
| Tabela 6.4 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com diversos combustíveis | 98 |
| Tabela 6.5 - Taxa de geração de material particulado por quilo de combustível aplicado em fornalha durante teste de queima | 100 |

RESUMO

Os resíduos sólidos de madeira encontram-se freqüentemente associados a problemas de disposição em operações de aterramento. Apesar da vocação natural desses materiais para sua utilização em processos de combustão, um volume expressivo desses resíduos tem sido descartado em aterros, em função de inúmeros impasses, tais como a desuniformidade dimensional das peças, a eventual presença de elementos estranhos ao material lenhoso (pregos, fios, arames), a umidade excessiva, o baixo poder calorífico, dentre outros fatores que levam diariamente uma elevada quantidade desses materiais ao descarte. Podas de árvores em grandes centros urbanos, resíduos provenientes da indústria da construção civil, bem como resíduos de madeira provenientes de processos industriais são alguns dos materiais avaliados no presente trabalho para o estudo da viabilidade de transformação desses resíduos em um combustível sólido com características adequadas para uma potencial aplicação do produto no mercado de combustíveis para geração de energia térmica.

Foram aplicados diversos tratamentos envolvendo o processamento mecânico para obtenção de cavacos e o processamento térmico dos mesmos, onde foram testadas faixas de temperaturas de 160 a 260° C, em escala de laboratório e escala real, durante quinze minutos para avaliação do incremento do poder calorífico nos materiais. A perda de massa no processo em escala real variou de 10,50 a 21,53%, com o rendimento energético tendo variado de 87,51 a 96,88 %. A comparação entre os resultados obtidos em escala de laboratório e escala real variou dentro de uma faixa de 1,82 a 17,23%. O poder calorífico superior do produto obtido nos diversos tratamentos, em escala real, ficou entre 4.653 e 4.796 kcal/kg. Na aplicação do produto obtido, foram realizados testes em um forno de panificação, onde foram realizadas amostragens isocinéticas na chaminé, para avaliação dos níveis de emissão de partículas para a atmosfera, em comparação com outros tipos de aplicação de biomassa como combustível. A taxa de geração de material particulado por quilo de combustível aplicado foi de 4,57 g/kg com o forno utilizando lenha, 2,77 g/kg com o forno utilizando cavaco sem tratamento térmico e de 1,73 g/kg com a unidade operando com o cavaco processado termicamente.

Palavras chave: resíduos de madeira, torrefação de madeira, combustível de biomassa, cavacos de madeira torreficados.

ABSTRACT

Wood wastes are often associated to problems in landfill disposal. In spite of the natural tendency of the use of these materials in combustion processes, the most part is being landfilled without use, due to several deadlocks such as uneven shape of the pieces, eventual presence of strange elements in the ligneous material (nails and wires), the excessive humidity, the low calorific power, among other facts that result in a great quantity of these materials being daily discharged. Trees pruning in large urban areas, waste from building construction as well as wooden waste deriving from industrial procedures are some of the material evaluated in this work in order to test the feasibility of their transformation into a solid fuel with adequate characteristics for use in thermal energy production, achieving economic value in the fuel market.

Different treatments were applied involving mechanical procedure to obtain splinters of regular size, and their thermal processing at temperature range from 160° to 260° C for fifteen minutes, in laboratory and industrial scale, evaluating the increment in the calorific value. The weight loss in industrial scale showed variation from 10.50% to 21.53% with an energetic yield varying between 87.51 and 96.88%. The comparison between the results obtained in laboratory and industrial scales varied within a range of 1.82% to 17.23%. The gross calorific value of the product obtained in several treatments, in industrial scale, varied between 4,653 and 4,796 kcal/kg. Application tests of the obtained product were undertaken in a bakery furnace, with isokinetic sampling of particles in the stack gases, in order to evaluate the level of particles emission in the atmosphere, comparing the emission with the results when using other biomass fuels. The rate of particle emission per kilogram of fuel burnt was 4.57 g/kg with the furnace using conventional timber; 2.77 g/kg with the furnace using the splinters without thermal treatment and 1.73 g/kg with the unit operating with the splinter thermally processed.

KEYWORDS: wood wastes; wood pyrolysis; biomass fuel; roasted wood chips.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O acelerado processo de industrialização observado no último século, aliado à crescente concentração demográfica e urbanização da sociedade, tem acarretado um aumento considerável na produção de resíduos sólidos, com inevitáveis implicações ambientais (ROCCA et al., 1993).

Os resíduos sólidos de madeira, apesar do baixo potencial poluidor, têm-se constituído de problemas com significativa magnitude nos locais de disposição final, principalmente pelas dificuldades observadas em operações nas frentes de aterramento, além do comprometimento da qualidade da compactação nas células de aterros. Esses resíduos, da forma como são dispostos, encontram-se em condições impróprias para utilização direta como combustível sólido, em função de inúmeros problemas, tais como a desuniformidade dimensional das peças, a eventual presença de elementos metálicos (pregos, arames, parafusos), a umidade excessiva, o baixo poder calorífico, entre outros fatores que levam diariamente uma elevada quantidade desses materiais ao descarte, apesar da aptidão natural que os mesmos possuem para sua utilização nos processos de combustão.

Resíduos lenhosos provenientes da poda de árvores, descarte de estrados, galhadas de maciços florestais, carretéis, restos de embalagens, sobras da indústria de construção civil, são algumas fontes que podem ser utilizadas para viabilização da produção de combustíveis sólidos como alternativa de reciclagem de materiais, contribuindo, dessa forma, para o efetivo desenvolvimento sustentável.

O uso da madeira como fonte de energia é, talvez, a mais antiga das alternativas (MATOS et al., 1982). Na década de 50, cerca de 50% da energia consumida no Brasil era originada da biomassa (REZENDE, 1982). Com o passar do tempo, o consumo total e a contribuição da biomassa caíram, chegando a faixa de 27%, enquanto no mesmo período, combustíveis fósseis passaram de 28% para 44% de participação na matriz energética nacional. O futuro do país vem apontando, no entanto, para a necessidade do estabelecimento de um perfil energético auto-sustentável, de grande estabilidade e, sobretudo, livre de fontes de suprimento externas (D'ÁVILA e MAKRAY, 1981).

Um ponto relevante a ser abordado encontra-se relacionado às emissões atmosféricas provenientes dos processos de combustão. A atual preocupação ecológica levou ao estabelecimento de normas ambientais rigorosas. Os limites especificados para alguns poluentes atmosféricos dependem do tipo de combustível e da capacidade nominal das fontes estacionárias (PINHEIRO, 1995). A viabilidade ambiental de um combustível alternativo, portanto, encontra-se também relacionada aos níveis de emissão de poluentes verificados quando o mesmo é utilizado e não apenas à sua origem como matéria reciclada.

1.2 Utilização das fontes de energia

O fogo foi a primeira fonte de energia descoberta e conscientemente controlada pelo homem. Fazer fogo e utilizá-lo de maneira produtiva foi fundamental para iniciar o caminho rumo à civilização. Durante quase todo o tempo histórico, o homem dispôs somente da energia de sua própria força muscular, da tração animal, da lenha, da captação do movimento das águas (roda hidráulica) e dos ventos (moinhos de vento). A partir do século XIX, a lenha passou a ser substituída pelo carvão, e no século XX, a base da moderna civilização industrial foi assentada pelo uso generalizado do petróleo e da eletricidade, fundamentando grande parte da economia no uso de recursos fósseis. Depois da II Guerra Mundial, foi desenvolvido o aproveitamento tecnológico da energia nuclear como fonte geradora de eletricidade e como recurso adicional, para atender à expansão crescente do consumo de energia. A evolução da tecnologia moderna é caracterizada por um aumento e um controle cada vez maior sobre a energia. O acesso ao suprimento energético é base importante da existência humana, essencial à satisfação das necessidades básicas da sociedade moderna.

No mundo contemporâneo, a energia proveniente dos combustíveis fósseis – carvão mineral, gás natural e petróleo – é a mais solicitada, como pode ser observado nas Figuras 1.1 e 1.2. O consumo energético tem aumentado sempre, uma vez que está intimamente associado ao desenvolvimento das forças produtivas. Desta forma, o vertiginoso progresso experimentado pela humanidade nas últimas décadas aumentou drasticamente o consumo dos combustíveis fósseis, a ponto de as previsões para os próximos cinquenta ou cem anos indicarem o esgotamento das reservas, se mantidas as taxas anuais de crescimento industrial (NEIVA, 1987).

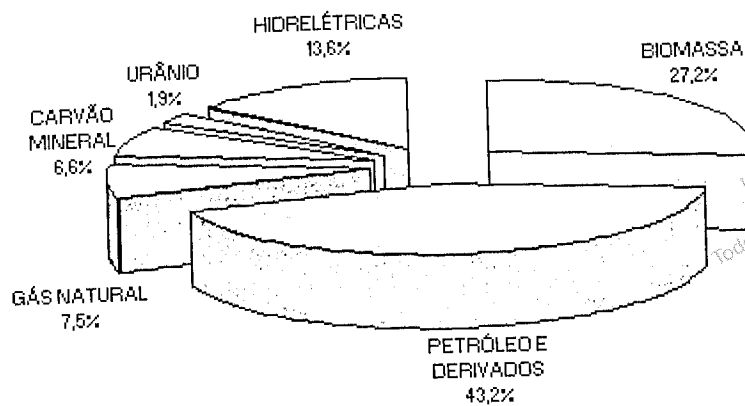
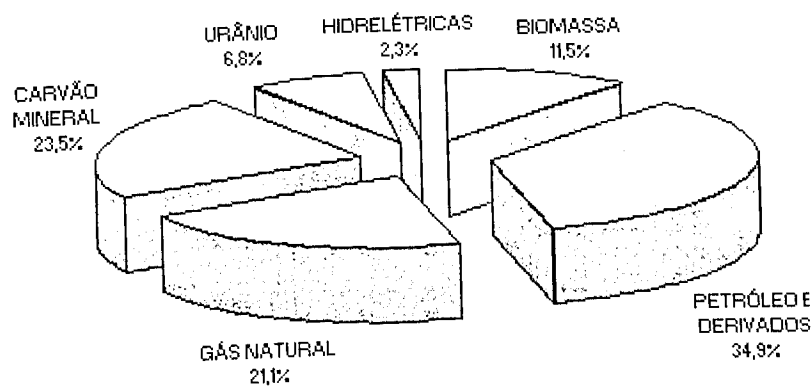


Figura 1.1 - Oferta interna de energia no Brasil em 2002

Fonte - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004.



Fonte - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004.

Apesar das previsões de exaustão das reservas, o homem prossegue manipulando as mesmas fontes de energia, sem grandes alterações nas proporções de uso das matrizes energéticas tradicionais. Por outro lado, procura-se otimizar o uso das fontes energéticas disponíveis, partindo-se para o desenvolvimento de formas não convencionais de energia, como o uso direto da energia solar armazenada na biomassa¹, a energia geotérmica, a eólica e a oriunda das marés e correntes. Surge então o conceito de energia renovável, assim denominada por ser proveniente de fontes renováveis de energia e, por conseguinte, reservas inesgotáveis e de menor potencial poluidor. No Brasil, 41% da matriz energética é renovável², enquanto a

¹ A energia de todos os biocombustíveis, diretos ou derivados, vem originalmente da radiação solar incidente, capturada durante a fotossíntese. A matéria orgânica carbonácea reage com oxigênio durante a combustão ou outras reações, liberando essa energia em forma de calor (Evans, 2001).

² Este valor foi obtido considerando a energia hidrelétrica como sendo uma fonte renovável, o que atualmente não se constitui de um consenso. Alguns aspectos considerados relevantes tais como a vida útil atribuída às barragens para geração de energia e os impactos causados pela inundação de áreas, alimentam uma discussão polêmica em torno da inclusão da energia hidrelétrica no mesmo patamar do grupo das energias consideradas limpas.

média mundial é de 14%, caindo nos países desenvolvidos para apenas 6%, segundo dados do Balanço Energético Nacional - edição 2003 (Figura 1.3).

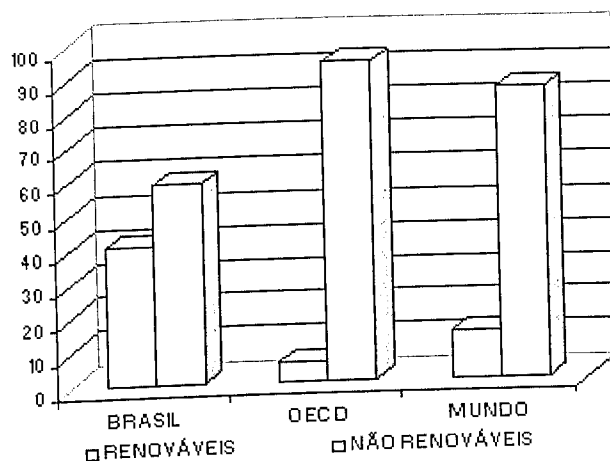


Figura 1.3 - Estrutura da oferta interna de energia (%) no Brasil, nos países da OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) e no mundo

Fonte - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004.

Não obstante ao fato de terem reservas finitas, a produção e o uso de energia não renovável são algumas das atividades humanas que produzem maior impacto sobre o meio ambiente. Mudanças climáticas globais sempre ocorreram ao longo da história da Terra em ciclos alternados de aquecimento e resfriamento. Entretanto, há evidências de uma tendência acelerada de aquecimento global a partir do início do século XX. Esta tendência estaria principalmente associada a alterações na composição dos gases atmosféricos, causadas por emissões provenientes das atividades antrópicas recentes. Esses gases são especialmente o dióxido de carbono (CO_2), o ozônio (O_3), o metano (CH_4), o óxido de nitrogênio (N_2O) e o vapor d'água (H_2O), produtos oriundos da utilização de energia. Essas alterações ambientais consistem de um dos maiores problemas enfrentados pela humanidade, uma vez que poderão proporcionar efeitos com graves conseqüências, como a alteração do nível do mar e do regime das chuvas, enfim, modificando profundamente o clima da Terra. Dentre os gases citados, o dióxido de carbono é considerado o principal responsável por esta tendência de aquecimento do clima mundial, uma vez que representa quantitativamente a maior parte das emissões, e pequenas modificações em sua concentração são capazes de produzir intensas flutuações na temperatura do globo (DREW, 1989). Esses gases atuam absorvendo parte da energia térmica desprendida pela superfície terrestre e voltando a irradiá-la, energia esta que assim retorna, em parte, à Terra (FELLENBERG, 1980). Esse fenômeno é conhecido como "efeito estufa".

É neste contexto que a utilização de recursos renováveis surge como uma alternativa viável e necessária, possibilitando a melhoria da qualidade de vida, o que significa a redução da emissão de poluentes, a busca de um desenvolvimento sustentável e a ampliação do acesso à energia, influenciando na inserção econômica e social das populações excluídas. O Brasil apresenta baixa taxa de emissão de CO₂ – 1,7 tCO₂/tep - pela utilização de combustíveis³, quando comparada com a média mundial, de 2,36 tCO₂/tep. A inserção de novas fontes renováveis na matriz energética brasileira poderá reduzir a emissão de milhões de toneladas de gás carbônico/ano, ampliando as possibilidades de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Kyoto (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004).

Outro fator deve ser levado em consideração quando se trata da determinação da fonte de energia a ser utilizada, o fator econômico. Existem hoje, inúmeros fornos e caldeiras funcionando com óleo combustível, o qual atingiu tal preço, que se tornou vantajosa a adaptação desses equipamentos para a utilização de combustíveis alternativos, tais como a lenha e seus derivados. Entretanto, estima-se que a utilização de combustíveis sólidos possa proporcionar perda de potência nas fornalhas, tornando necessário fazer algumas adaptações para manter a produção de calor demandada pelo processo. A perda ocorre devido à necessidade de permanência da partícula sólida por um maior período no interior da fornalha, para que a sua combustão seja completada, além da elevada umidade do material, uma vez que a água presente sofrerá evaporação. Esses fatores ocasionam baixas taxas de liberação de calor. É neste âmbito que os estudos de tecnologias que proporcionem a redução e uniformidade das dimensões da madeira a ser utilizada como combustível, além da eliminação do excesso de umidade, poderão proporcionar uma minimização na perda de potência nas unidades de geração de energia térmica, possibilitando ainda, maior controle sobre o processo de produção. Mesmo levando em consideração os custos com a transformação da matéria-prima, essa alternativa pode tornar-se ainda mais econômica que a utilização de óleo combustível. Aliado ao aspecto econômico, o produto a ser obtido incorpora a vantagem de ser uma tecnologia aplicável no Brasil, país tropical com grande vocação para produção de biomassa, além do fato de que o acesso à produção, independe de reservas e de fatores políticos e econômicos internacionais, como ocorre com o petróleo e seus derivados.

³ As taxas de emissão são normalmente dadas por *tep* – tonelada equivalente de petróleo – que é calculada através de fatores de conversão pela relação entre o poder calorífico de cada fonte e o poder calorífico do petróleo adotado de referência. Para cada tonelada equivalente de petróleo queimada no Brasil, ocorre uma maior proporção de combustíveis considerados renováveis (lenha, etanol) do que nos demais países.

No que concerne ao aspecto ambiental, além de ser uma fonte de energia renovável, o produto pode ser obtido através da reciclagem de resíduos de madeira, tais como o material proveniente de podas de árvores, galhadas, estrados, restos de embalagens, sobras da indústria da construção civil, além dos resíduos florestais descartados nos grandes maciços.

1.3 *Justificativas*

Os trabalhos de desenvolvimento de técnicas de reciclagem de resíduos têm sido suficientemente justificados por proporcionarem condições de reintrodução dos materiais nos processos produtivos. Entretanto, a opção pelo desenvolvimento de um combustível alternativo exige, de forma a viabilizar o processo, uma especial atenção às implicações ambientais decorrentes das emissões atmosféricas e resíduos gerados na queima.

Os estudos da viabilidade técnica e ambiental irão constituir-se da base de dados necessária para a aplicação das técnicas propostas de reciclagem dos resíduos de madeira, proporcionando a otimização dos processos de combustão com o uso de um recurso renovável, o qual, seguramente, tem sido a fonte primária de energia em que se encontram depositadas as maiores chances de redução do consumo de combustíveis fósseis.

Cabe salientar que os resíduos provenientes da combustão da madeira e seus derivados, tais como cinzas e fuligem, constituem-se de materiais com características adequadas para disposição em solos de utilização agrícola, sem maiores restrições quanto às concentrações de contaminantes presentes. Em contrapartida, existem trabalhos técnicos alertando para os riscos dos resíduos gerados (cinzas, fuligem) pela queima dos combustíveis fósseis, por possuírem níveis de concentração de contaminantes tóxicos que podem exigir cuidados especiais para sua disposição final (PROBSTEIN e HICKS, 1985). Entretanto, cuidados especiais também deverão ser tomados quanto à utilização de resíduos de madeira contaminados com aditivos orgânicos, tanto em relação às emissões de substâncias tóxicas (dioxinas e furanos), como em relação aos resíduos sólidos provenientes da queima.

O presente trabalho busca o aproveitamento de uma fonte energética alternativa, reunindo técnicas de reciclagem, otimização dos processos de combustão e minimização dos níveis de emissão de poluentes, visando contribuir, dessa forma, para a adoção de processos produtivos mais equilibrados, no atendimento aos requisitos de geração de energia térmica.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

Estudar a viabilidade técnica e ambiental da utilização de resíduos de madeira para a produção de um combustível alternativo.

2.2 *Objetivos específicos*

Avaliar a variação do poder calorífico de resíduos de madeira submetidos ao processo de fragmentação mecânica e tratamento térmico em diversas temperaturas;

Avaliar os níveis de emissões de partículas no fluxo gasoso proveniente da combustão dos resíduos de madeira em seu estado natural e após tratamento mecânico e térmico, em fontes estacionárias, através de campanhas de amostragens isocinéticas e análises laboratoriais;

Avaliar a possibilidade da utilização do combustível alternativo, com atendimento aos padrões legais de emissão de poluentes, sem a adoção de dispositivos de tratamento de gases.

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Características dos resíduos de madeira e fontes potenciais de geração

ROCCA et al. (1993) apresentam a reciclagem, através do reuso ou recuperação de resíduos ou de seus contribuintes com algum valor econômico, como a forma mais atraente de solução dos problemas de gerenciamento de resíduos, tanto do ponto de vista empresarial, como dos órgãos do poder público ligados à proteção e defesa do meio ambiente.

O adequado transporte, tratamento e disposição final de resíduos apresentam, via de regra, um custo que pode ser considerado elevado para a sociedade. Do ponto de vista dos órgãos de proteção do meio ambiente, essa prática pode ser acatada com grande conveniência, pois diminui a quantidade de resíduos lançados no meio ambiente, além de contribuir para a conservação dos recursos naturais, minimizando ainda a utilização dos recursos naturais não renováveis. Sob o enfoque da iniciativa privada, o reaproveitamento dos resíduos que seriam descartados poderá transformar-se em receita adicional ou mesmo em economia na aquisição de novos insumos. Em termos práticos, alguns fatores são relacionados por ROCCA et al. (1993) para viabilização da recuperação de um resíduo:

- proximidade da instalação de reprocessamento;
- custos de transporte dos resíduos;
- volume dos resíduos disponíveis para reprocessamento;
- custos de estocagem do resíduo no ponto de geração ou fora do local de origem.

Dessa forma, só haverá viabilidade econômica na recuperação de um material se seu valor de mercado atingir um preço superior aos custos relativos ao transporte, estocagem e reprocessamento. Dentro dessa linha, SHREVE e BRINK JR (1977) apontam os aumentos dos preços da energia, do transporte, além da diminuição das áreas disponíveis para disposição de rejeitos, como os fatores de maior incentivo ao aproveitamento da energia contida nos resíduos sólidos através da sua utilização em sistemas de combustão.

Para incentivar as atividades de reciclagem, têm sido criados em muitos países, inclusive no Brasil, sistemas de troca de informações através de publicações denominadas "Bolsas de Resíduos". Os interessados em disponibilizar resíduos anunciam na publicação, indicando volumes, características físico-químicas e quantidades dos resíduos. Os interessados na aquisição entram em contato com a "Bolsa de Resíduos" ou diretamente com o anunciante para acertar os aspectos econômicos e operacionais da transação. No Brasil, as iniciativas, até então, têm sido consideradas ineficientes, seja por desconhecimento, desconfiança por parte do empresariado, ou mesmo por algum tipo de receio em anunciar os resíduos gerados pelos processos de produção. De qualquer forma, um dos maiores problemas relacionados a qualquer "Bolsa de Resíduos" tem sido a dificuldade de se controlar a "qualidade" dos materiais anunciados, de modo a atender aos padrões requeridos para os processamentos. Por serem gerados em processos que apresentam variações, quase todos apresentam composições e características diferentes, dificultando a sua utilização direta como matéria-prima (ROCCA et al., 1993). Em relação aos resíduos de madeira, a variabilidade da composição e as influências sobre as suas características proporcionam o mesmo tipo de problema.

A madeira se constitui de uma substância complexa, de caráter polimérico. De 40 a 50% do peso da madeira seca são de celulose. As paredes das células são constituídas por polissacarídeos, a hemicelulose e a lignina. A hemicelulose é uma mistura de polímeros de cadeia curta da arabinose, da galactose, da glicose, da manose e da xilose (como anidridos). A lignina é um polímero complexo de fenóis substituídos, que atuam como ligantes das fibras de celulose. Estão presentes em pequenas quantidades diversos materiais extraíveis (SHREVE e BRINK JR., 1977).

VIVACQUA FILHO et al. (1982) pesquisaram as variações da composição elementar da madeira, segundo referências de diversos autores. As variações verificadas na composição química elementar não foram consideradas conflitantes, de acordo com os valores apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição elementar da madeira

| Composição química | Referência dos autores | | | | | |
|---------------------|------------------------|-----------|---------------------|------|-------|------|
| | Goldstein | Charles | Kanury e Blackshear | Klar | Jones | |
| | | | | | * | ** |
| Carbono | 50,0 | 48,5-50,5 | 50,0 | 40,0 | 40,0 | 50,0 |
| Oxigênio | 44,0 | 43,0-45,0 | 43,5 | 34,2 | 34,0 | 42,5 |
| Hidrogênio | 6,0 | 6,0-7,0 | 6,0 | 4,8 | 4,8 | 6,0 |
| Nitrogênio e cinzas | <1,0 | - | - | - | - | - |
| Nitrogênio | - | - | 0,1 | - | 0,4 | 0,5 |
| Cinzas | - | - | 0,4 | 1,0 | 0,8 | 1,0 |
| Água | - | - | - | 20,0 | 20,0 | - |

(*) Base úmida

(**) Base seca

Fonte - VIVACQUA FILHO et al., 1982. p. 61.

Em função das variações ocasionadas pela diversidade de espécies vegetais, idade das plantas, tipos de terreno e clima, os valores médios obtidos foram considerados representativos pelos autores, para fins práticos.

Os átomos de carbono, oxigênio e hidrogênio ordenam-se de diferentes formas, montando os três principais polímeros que compõem a madeira, dando origem à formação da celulose, hemicelulose e lignina. Ocorre dessa forma, o armazenamento da energia solar na biomassa, através dos processos fotossintéticos desenvolvidos pelos vegetais. A proporção dos principais componentes da madeira, segundo autores diversos, é apresentada na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Proporção dos diversos componentes da madeira segundo diversos autores

| Composição química | Referência dos autores | | | | | Média |
|--------------------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|-----------|-------|
| | Goldstein | Charles | Kanury e Blackshear | Jones | | |
| | | | | * | ** | |
| Celulose | 50,0 | 30,0-63,0 | 40,0 | 40,0-44,0 | 43,0-47,0 | 44,7 |
| Hemicelulose | 25,0 | 20,0-30,0 | 40,0 | 25,0-29,0 | 25,0-35,0 | 29,4 |
| Lignina | 25,0 | 20,0-30,0 | 20,0 | 25,0-31,0 | 16,0-24,0 | 23,6 |
| Extrativos | - | - | - | 1,0-5,0 | 2,0-8,0 | 4,0 |

(*) Madeira macia

(**) Madeira dura

Fonte - VIVACQUA FILHO et al., 1982. p. 62.

Como fonte de caráter renovável, o potencial da madeira é elevado, mas o desperdício é verificado em grande proporção. Segundo SHREVE e BRINK JR (1977), os resíduos da floresta explorada chegam a 30% do material aproveitado para as indústrias de polpa e papel. "Sucata Verde" é a denominação aplicada por esses pesquisadores aos restos de árvores das áreas exploradas, os quais indicam uma tendência ao aumento da competitividade das atividades de aproveitamento desses materiais, em virtude das constantes elevações de preço dos derivados de petróleo.

Enquanto nos maciços florestais implantados com a finalidade de suprimento de carvão vegetal para o segmento metalúrgico boa parte dos resíduos florestais são normalmente utilizados na produção de carvão, outras atividades nem sempre conseguem o mesmo nível de aproveitamento. A produção de celulose e papel, as indústrias moveleiras ou de painéis de madeira conseguem aproveitar apenas o fuste principal das árvores em seus processos, tratando todo o resto como resíduo. POGGIANI (1981) ressalta em seus estudos o impasse entre realizar a deposição dos resíduos florestais no solo, reciclando nutrientes e matéria orgânica para a própria cultura, e a exportação desses resíduos para fora dos maciços. Considerando que as galhadas precisariam ser recolhidas na área, picadas e transportadas, as vantagens do aproveitamento desses resíduos para geração de energia encontram-se estreitamente ligadas à quantidade dos resíduos gerados, facilidade de transporte e aproveitamento industrial, cabendo uma análise criteriosa para cada situação específica.

Levando em consideração a decomposição dos resíduos florestais no maciço, pela ação dos agentes biológicos, pode-se considerar a geração do metano como um fator relevante, em relação ao balanço das emissões dos principais gases responsáveis pelo "efeito estufa".

Estudos conduzidos por LEVANDER (1990) sobre as contribuições relativas dos diversos gases sobre o efeito estufa indicam que cada mol de metano (CH₄) pode absorver 25 vezes mais radiação de calor que cada mol de dióxido de carbono (CO₂). A Tabela 3.3 apresenta a razão da relação entre a absorção da radiação de calor dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa e o dióxido de carbono (CO₂).

Tabela 3.3 – Potencial de aquecimento global entre os principais gases responsáveis pelo efeito estufa e o dióxido de carbono (CO₂)

| Gases | Razão da absorção da radiação de calor em relação ao dióxido de carbono | |
|----------------------|---|--------|
| | Por mol | Por kg |
| Dióxido de carbono | 1 | 1 |
| Metano | 25 | 70 |
| Óxidos de nitrogênio | 200 | 200 |
| Ozônio | 2.000 | 1.800 |
| CFC - 11 | 16.000 | 5.000 |
| CFC - 12 | 20.000 | 7.000 |
| HCFC - 22 | 7.000 | 3.500 |

Fonte - LEVANDER, 1990. p. 2.708.

Duas culturas de eucalipto de diferentes espécies e idades são comparadas em um experimento conduzido por POGGIANI (1981), em que pode ser observada a relação entre a fitomassa total e a fitomassa do fuste. Pode-se observar que em torno de 15% da fitomassa total gerada pelas duas culturas não faz parte do fuste das árvores, podendo ser considerada como resíduo florestal, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Produção de fitomassa em duas culturas de eucalipto

| Espécie | Idade | Espaçamento | Fitomassa total (kg/ha) | Fitomassa do fuste (kg/ha) | Resíduo florestal (%) |
|------------|----------|-------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|
| E. saligna | 8 anos | 3 m x 2 m | 106.250 | 89.970 | 15,32 |
| E. grandis | 2,5 anos | 1 m x 1,5 m | 85.714 | 72.311 | 15,64 |

Fonte - Adaptado de POGGIANI, 1981. p. 29.

Em grandes centros urbanos ou áreas industrializadas, outras fontes de resíduos podem gerar quantidades significativas de madeira, para a avaliação da possibilidade de aproveitamento desses materiais. As grandes cidades, urbanizadas com espécies florestais nativas e exóticas, administram a interferência do crescimento das árvores com a limitação de espaço, tanto para o crescimento da copa e do fuste principal, como das raízes. O suprimento de energia elétrica, telefonia, cabos de TV, são levados até pontos de conexão através de postes, na maioria das

LEI DO DIREITO AUTORAL
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sem o consentimento dos meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

idades brasileiras, exigindo podas constantes nas copas das espécies vegetais utilizadas nos planos de urbanismo. Por outro lado, as raízes, em busca de água e nutrientes no subsolo, interferem constantemente nas tubulações destinadas ao suprimento de água potável, esgotamento sanitário e escoamento de águas pluviais. Essa constante divisão do espaço entre as redes de serviços urbanos e a arborização, ambos essenciais à manutenção da qualidade de vida da população nas cidades, leva diariamente uma quantidade significativa desses materiais obtidos nas operações de poda às células de aterramento.

O material proveniente das podas urbanas que chega diariamente ao aterro sanitário do município de Belo Horizonte é encaminhado, após pesagem, à central de compostagem. No local são separados os "materiais verdes" e galhos finos, para serem triturados e incorporados às pilhas de produção de composto orgânico. Os materiais lenhosos, via de regra com alto teor de umidade (acima de 30%), são separados para utilização como lenha ou seguem para as frentes de aterramento (Figura 3.1). A desuniformidade dimensional das peças, os elementos estranhos ao material (pregos, arames, faixas de tecidos, plásticos, fios), o alto teor de umidade e a grande variação na taxa de geração são dificuldades enfrentadas para se agregar valor econômico ao material e despertar interesse no mercado consumidor.

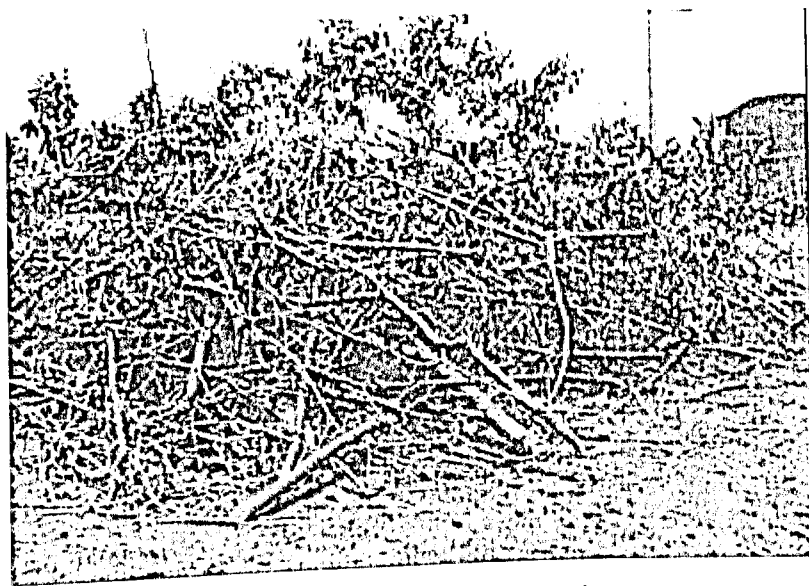


Figura 3.1 – Resíduos de poda de árvores

A indústria de construção civil, em função da grande utilização de madeira nas técnicas construtivas, constitui-se em outra fonte alternativa de geração desses materiais (Figura 3.2). O SINDUSCON (Sindicato da Indústria da Construção Civil) estima que mais de um terço da madeira utilizada nas obras transforma-se em resíduo, ao final dos trabalhos. A

desuniformidade das peças, a variação na taxa de geração e a presença de elementos metálicos são os maiores entraves ao aproveitamento desses materiais para geração de energia, o que torna mais viável, na maioria das vezes, o descarte.

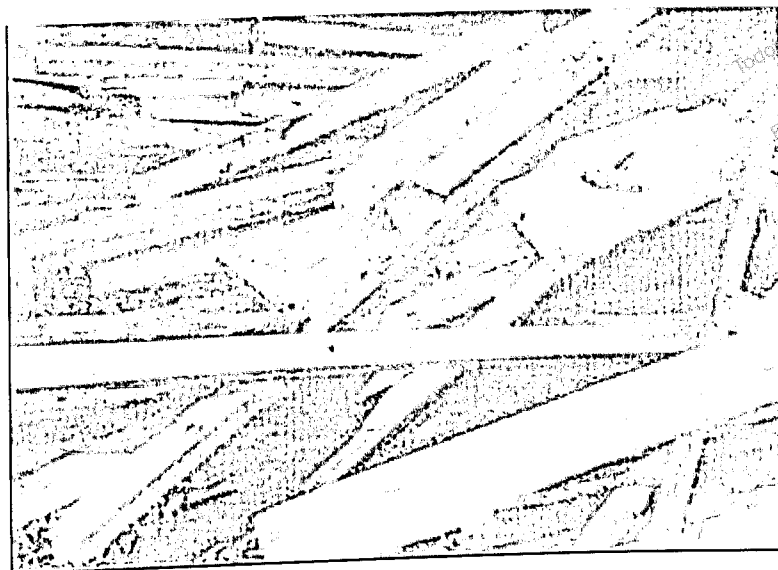


Figura 3.2 – Resíduos de construção civil

Outras fontes viáveis a serem consideradas são as indústrias de transformação. Não só as unidades industriais associadas ao segmento da madeira, mas a maioria das indústrias, possuem em seus inventários de resíduos um controle da taxa de geração dos resíduos de madeira. Embalagens de equipamentos, descartes de peças, estrados, são armazenados transitoriamente nos depósitos dessas unidades, para posterior descarte.

Em se tratando da possibilidade da utilização de resíduos como combustíveis em substituição aos derivados de petróleo, a propriedade de maior importância consiste no poder calorífico desses produtos. Define-se o poder calorífico de um combustível como a quantidade de calor liberado na combustão completa de uma unidade de massa do combustível, podendo ser expresso em kcal/kg ou cal/g para combustíveis sólidos e líquidos e em kcal/m³ para combustíveis gasosos. O poder calorífico pode ser determinado teoricamente através da composição química ou experimentalmente em bomba calorimétrica. (VIVACQUA FILHO et al., 1982)

LEME (1984), estudando a composição física do lixo de diversas comunidades, inclui a madeira como um componente que varia dentro de uma faixa de 1 a 4% na composição do lixo, apresentando 2% como uma ocorrência típica, com o material se apresentando com

umidade entre 15 e 40% (média típica de 20%), massa específica entre 128,1 kg/m³ e 320,4 kg/m³ (média típica de 240,3 kg/m³) e composição elementar de 49,5% de carbono, 6,0% de hidrogênio, 42,7% de oxigênio, 0,2% de nitrogênio e 0,1% de enxofre, com 1,5% de cinzas.

MENDES et al (1982) apresentam uma equação para cálculo do poder calorífico, a partir da composição elementar:

$$PCI = \frac{\%C}{100} \times 8.100 + \frac{34.000}{100} \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) \quad (3.1)$$

Em que:

PCI = poder calorífico, em kcal/kg;

%C = percentual de carbono, em peso seco;

%H = percentual de hidrogênio, em peso seco;

%O = percentual de oxigênio, em peso seco;

Como 1 BTU = 0,252 kcal e 1 libra = 0,4536 kg, obtém-se que 1 BTU/Lb = 0,5556 kcal/kg.

Assim sendo, a equação modificada pode ser escrita como:

$$PCI = \frac{\%C}{100} \times 14.580 + \frac{61.200}{100} \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) \quad (3.2)$$

Em que:

PCI = poder calorífico, em BTU/libra.

%C, % H e %O são os percentuais dos elementos contidos no material, em peso seco.

O conhecimento do grau de umidade faz-se necessário para a avaliação do poder calorífico e tem grande importância para a determinação da potência liberada pela sua combustão. O grau de umidade, em percentagem, é expresso pela massa de água por unidade de massa do material seco ou úmido, podendo ser calculado pela equação (LEME, 1984):

$$P_u = \left[\left(\frac{a - b}{a} \right) \right] \times 100 \% \quad (3.3)$$

Em que:

P_u = Percentual de umidade, em %;

a = massa inicial do material, quando amostrada;

b = massa do material após secagem.

3.2 Influência das reações de pirólise e carbonização no poder calorífico da madeira e seus derivados

Designa-se combustão, o fenômeno da oxidação de um corpo realizado em um tempo breve, determinando uma combinação química de caráter exotérmico (TORREIRA, 1995).

Estudos desenvolvidos por MITRE (1982) e DINIZ (1981) relatam o processo de combustão da lenha como ocorrendo em três estágios ou zonas definidos por faixas de aquecimento, a saber:

- zona de secagem ou evaporação de água contida no material, o que ocorre de fora para dentro e requer certo tempo, sendo maior o tempo em pedaços maiores;
- zona de destilação e queima dos voláteis contidos no material, com a ocorrência de chama longa;
- zona de queima do carbono fixo, o que ocorre em temperaturas da ordem de 400 °C a 550 °C com a extinção da chama em temperaturas inferiores.

Observando um pedaço de madeira úmida sendo introduzido numa fornalha em chamas, no entanto, verifica-se a ocorrência dos três estágios simultaneamente, uma vez que há interferência do vapor d'água que se desprende do primeiro estágio com a destilação ocorrida no segundo e assim sucessivamente, durante a alimentação de combustível. As flutuações de carga e de liberação de energia ocorrerão tanto quanto maiores forem as dimensões das toras de madeira introduzidas na fornalha, assim como quanto maior for a umidade do material. Pode ser justificada dessa forma, a pretensão da utilização de um combustível sólido dividido

em partes menores, que poderão proporcionar uma maior superfície de contato com o ar, possibilitando um menor excesso de ar na queima, menores flutuações nas taxas de transmissão de energia térmica para a fornalha, tornando o processo de combustão mais uniforme e eficiente (DINIZ, 1981).

Quanto à eliminação da umidade antecedendo à combustão, dois fatores de eficiência encontram-se relacionados:

- o rendimento térmico, definido como o percentual do calor absorvido pela fornalha em relação ao calor gerado pelo processo de combustão;
- a relação entre o poder calorífico da lenha e o percentual de umidade contido.

As Tabelas 3.5 e 3.6 ilustram claramente as vantagens da eliminação da umidade.

Tabela 3.5 – Percentual do calor absorvido na fornalha em relação ao calor desenvolvido na combustão (rendimento térmico percentual)

| Temperatura (°C) dos gases na chaminé | %Umidade da Lenha | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| 200 | 81,4 | 80,0 | 78,1 | 75,8 | 72,7 | 68,4 | 61,9 | 51,1 | 29,4 |
| 225 | 80,2 | 78,7 | 76,9 | 74,5 | 71,4 | 67,0 | 60,4 | 49,3 | 27,3 |
| 250 | 79,0 | 77,5 | 75,7 | 73,3 | 70,0 | 65,6 | 58,8 | 47,6 | 25,2 |
| 275 | 77,8 | 76,3 | 74,4 | 72,0 | 68,7 | 64,1 | 57,3 | 45,9 | 23,0 |
| 300 | 76,6 | 75,1 | 73,2 | 70,7 | 67,4 | 62,7 | 55,7 | 44,1 | 20,9 |
| 325 | 75,5 | 73,9 | 71,9 | 69,4 | 66,0 | 61,3 | 54,2 | 42,4 | 18,8 |
| 350 | 74,3 | 72,7 | 70,7 | 68,1 | 64,7 | 59,9 | 52,7 | 40,7 | 16,7 |

* Cálculos com PCS

Fonte - DINIZ, 1981. p. 120.

Tabela 3.6 – Poder calorífico superior - PCS e inferior - PCI da lenha em função da umidade

| Poder calorífico | %Umidade da Lenha | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| PCS (kcal/kg) | 5083 | 4575 | 4067 | 3558 | 3050 | 2542 | 2033 | 1525 | 1017 |
| PCI (kcal/kg) | 4756 | 4221 | 3687 | 3153 | 2619 | 2085 | 1551 | 1016 | 482 |

Fonte - DINIZ, 1981. p. 117.

As tabelas apresentadas demonstram os ganhos significativos no rendimento térmico e poder calorífico com a eliminação da umidade. Contudo, mesmo após a zona de secagem, ainda há uma fase de aquecimento do material em que a energia consumida é maior do que a energia liberada (fase endotérmica), precedendo a carbonização do material.

Alguns fatores que influenciam o processo de secagem da madeira foram descritos por GALVÃO e JANKOWSKY (1985):

- a difusão da água higroscópica ocorre através das paredes celulares, em consequência do gradiente de umidade;
- a rapidez ou facilidade de secagem (coeficiente de difusão da água higroscópica), varia diretamente com a temperatura e umidade, inversamente com a densidade e depende da direção estrutural na madeira;
- durante o aquecimento da peça, o vapor d'água move-se na madeira, pelo interior das cavidades das células e aberturas que as ligam, através do fenômeno de difusão que ocorre em consequência da formação de um "gradiente de pressão de vapor".

De acordo com SIAU (1971), citado por GALVÃO e JANKOWSKY (1985), outro fator que influencia na facilidade de a água higroscópica difundir-se na madeira é a direção estrutural considerada. O coeficiente de difusão longitudinal é em média, de duas a quatro vezes maior que o transversal à umidade de 25% e de cem vezes maior à umidade de 5%. Os autores concluem que a movimentação da água do interior para a superfície depende da temperatura de secagem, permeabilidade, densidade da madeira, espessura das peças e gradientes de umidade. Durante o processo de secagem, há uma fase em que a quantidade de água transferida para a superfície é menor que a água que se evapora na superfície. Nessas condições, o teor de umidade superficial diminui para valores inferiores à umidade de saturação do ar. Da primeira Lei de Fick pode-se inferir que o fluxo de umidade na madeira é proporcional ao gradiente de umidade:

$$\frac{m}{tA} = K \cdot \frac{\Delta u}{e} \quad (3.4)$$

Em que (m) é a massa de água movimentando-se através da peça de madeira com espessura (e) , em tempo (t) , através de uma área (A) perpendicular à direção do fluxo considerado; (K) é o coeficiente de difusão; (Δu) é a diferença do teor de umidade entre as duas superfícies consideradas na peça.

Almeida e Rezende (1982) definem a secagem como a evaporação da água contida na madeira sob diversas formas:

- água higroscópica, contida no interior das fibras, evaporada até a temperatura de 110 °C;
- água absorvida pelas paredes das células, evaporada à faixa de temperatura compreendida entre 110 °C e 150 °C;
- água quimicamente ligada, evaporada à faixa de temperatura compreendida entre 150 °C e 200 °C.

Acima de 150 °C, entretanto, já se iniciaram as reações de degradação térmica de alguns constituintes da madeira, como a lignina, dando seguimento ao processo conhecido como pirólise.

Diversos autores definem pirólise, tais como em BARROS (1996), PROBSTEIN e HICKS (1985), ALMEIDA e REZENDE (1982), como sendo o processo de decomposição térmica em que a matéria orgânica é convertida em diversos subprodutos, sob atmosfera redutora. Como a atmosfera é redutora, com a ausência de oxigênio livre, o processo tende a aumentar a concentração de carbono, sendo denominado carbonização (ALMEIDA e REZENDE, 1982).

A origem da utilização do processo de carbonização da madeira pode ser traçada desde a mais remota antiguidade. O primeiro processo químico foi provavelmente a fabricação do carvão de madeira, usado pelos habitantes das cavernas como combustível sem fumaça. No antigo Egito, conhecia-se um processo de destilação da madeira, da qual se obtinha não apenas o carvão, mas também o alcatrão e o ácido pirolenhoso, sendo este usado nos embalsamentos (SHREVE e BRINK JR., 1977).

Conforme os estudos desenvolvidos por VIVACQUA FILHO et al. (1982), o comportamento da madeira diante do processo de carbonização pode ser representado pelo somatório dos comportamentos isolados dos seus três principais componentes, que são a celulose, a

hemicelulose e a lignina. Embora tenha sido detectada uma pequena interação quando estes componentes estão juntos, os efeitos frequentemente podem ser considerados quase desprezíveis e o estudo de cada um separadamente representa uma boa aproximação do fenômeno como um todo. Cada um desses componentes participa de formas diferentes, gerando diferentes produtos, devido à natureza de sua composição química.

O trabalho de enumerar todos os produtos obtidos da decomposição térmica da madeira seria bastante extenso. BEAL e EICKMER (1977), citados por VIVACQUA FILHO et al. (1982), informam, em suas pesquisas, que já foram identificados 213 compostos produzidos durante a carbonização da madeira.

As reações envolvendo liberação ou absorção de energia e perda de massa são bastante distintas, caracterizando cada um dos principais componentes da madeira, fornecendo-lhes uma identidade peculiar. A perda de massa experimentada pela madeira e seus componentes isoladamente, quando submetida a um aquecimento contínuo e controlado, consiste de uma técnica denominada termogravimetria, de grande importância para se identificar as etapas que ocorrem durante a carbonização. O resultado obtido é apresentado em um gráfico, onde é mostrada a evolução da perda de massa sofrida pelo material em função da temperatura de aquecimento (Figura 3.3).

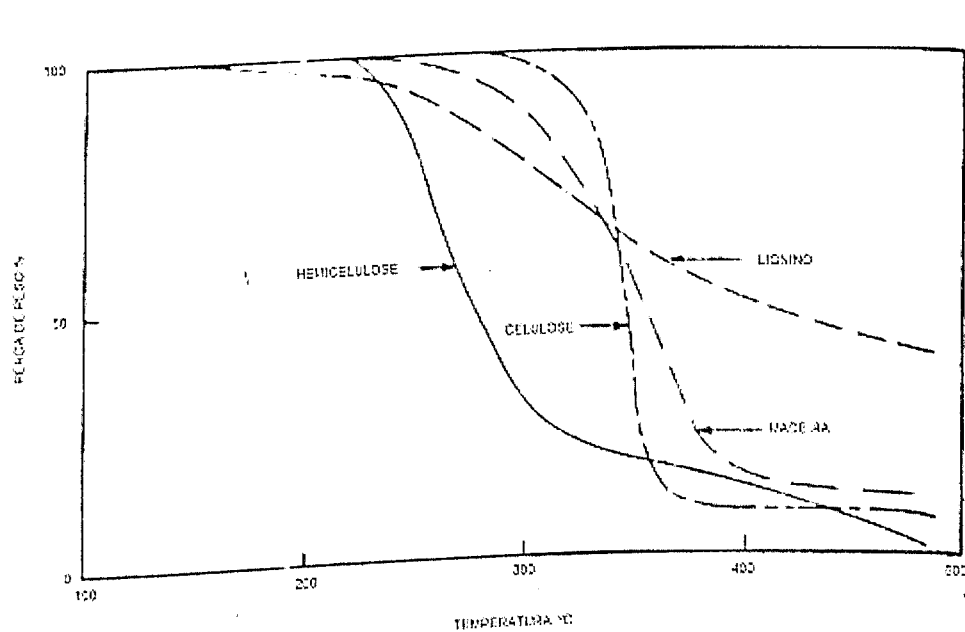


Figura 3.3 - Análise termogravimétrica da madeira e de seus componentes

Fonte - VIVACQUA FILHO (1982). p.64.

A degradação da celulose se processa rapidamente num curto intervalo de temperatura – cerca de 50 °C – provocando drásticas mudanças de comportamento e perdendo 77% da sua massa.

A hemicelulose começa a perder massa em temperatura próxima dos 225 °C, sendo o componente menos resistente ao tratamento térmico, pois sua degradação é quase completa na temperatura de 325 °C, perdendo massa continuamente sob ação do calor.

A lignina é o composto mais importante quando se objetiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo de carbonização está diretamente relacionado com o conteúdo de lignina na madeira. Embora a lignina comece a ser degradada em temperatura mais baixa, por volta de 150 °C, observa-se, ao contrário do comportamento da celulose e da hemicelulose, que a sua degradação é mais lenta. A lignina continua a perder massa, mesmo a temperaturas superiores a 500 °C, gerando um resíduo carbonoso. A perda de massa final experimentada pela lignina é bem menor do que os outros dois componentes principais da madeira.

A curva termogravimétrica da madeira, também representada na Figura 3.3, reflete, de maneira aproximada, a soma dos comportamentos individuais de cada componente. Os dados encontrados na literatura sobre pirólise de madeira contêm geralmente divergências, pois os resultados irão depender das condições em que a madeira se encontra e, principalmente, como a experiência foi conduzida (condições experimentais), da aparelhagem utilizada, dentre outros fatores. No caso de termogravimetria, por exemplo, a taxa de aquecimento e a sensibilidade do aparelho poderão influir decisivamente nos dados obtidos. A maneira de agrupar os fenômenos que ocorrem durante a carbonização difere de autor para autor (VIVACQUA FILHO et al., 1982).

PETER e BRUCH (2003) conduziram experimentos com pirólise de partículas de madeira com diâmetros variando entre 10 µm e 10 cm, descrevendo as faixas de temperatura de degradação da celulose entre 200 °C e 400 °C, da hemicelulose entre 200 °C e 260 °C e da lignina entre 280 °C e 500 °C.

Em todos os autores pesquisados, no entanto, há um consenso em que a lignina é o composto com a faixa mais ampla de temperatura no processo de degradação.

VIVACQUA FILHO et al. (1982), pesquisando BEALL e EICKMER (1977), adotaram uma classificação para os fenômenos decorrentes da pirólise em quatro regiões distintas:

zona A: compreendida até 200 °C. Esta é caracterizada pela produção de gases não combustíveis, tais como o vapor d'água e dióxido de carbono (CO₂). São produzidos também ácido fórmico e ácido acético;

zona B: compreendida na região de temperatura entre 200 °C e 280 °C. Nessa etapa são produzidos os mesmos gases da zona A, com uma substancial diminuição dos vapores de água e o aparecimento do monóxido de carbono (CO). As reações que ocorrem nesta zona são de natureza endotérmica;

zona C: de 280 °C a 500 °C. Ocorre a carbonização através de reações exotérmicas. As temperaturas em que as reações exotérmicas ocorrem não são identificadas com precisão, tendo sido objeto de estudos e discussões. Os produtos obtidos nessa etapa estão sujeitos a reações secundárias, são combustíveis e incluem o alcatrão, o licor pirolenhoso, monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄).

zona D: acima de 500 °C. Nesta região existe o carvão já formado. Várias reações secundárias ocorrem, catalisadas pelo leito de carvão.

DOAT e PETROFF (1975), citados por ALMEIDA e REZENDE (1982), demonstram esquematicamente a evolução dos produtos da carbonização da madeira em relação à temperatura, conforme a Tabela 3.7:

Tabela 3.7 – Evolução da carbonização da madeira em função do aumento das temperaturas

| | | Fases da Carbonização | | | | | |
|---|-----------------|-----------------------|------------------------------|---|--------------------------|-------------|--------------------|
| | | Secagem da Água | Produção de Gases Oxigenados | Íncio da produção de hidrocarbonetos | Fase dos hidrocarbonetos | Dissociação | Fase do hidrogênio |
| Temperatura (°C) | | 150-200 | 200-280 | 280-380 | 380-500 | 500-700 | 700-900 |
| Teor de carbono % em peso | | 60 | 68 | 78 | 84 | 89 | 91 |
| Gases não condensáveis (%) | CO ₂ | 68,0 | 66,5 | 35,5 | 31,5 | 12,2 | 0,5 |
| | CO | 30,0 | 30,0 | 20,5 | 12,3 | 24,6 | 9,7 |
| | H ₂ | 0,0 | 0,2 | 6,5 | 7,5 | 42,7 | 80,9 |
| Hidrocarbonetos | | 2,0 | 3,3 | 37,5 | 48,7 | 20,5 | 8,9 |
| Poder calorífico do gás (kcal/Nm ³) | | 1.100 | 1.210 | 3.920 | 4.780 | 3.630 | 3.160 |
| Constituintes condensáveis dos voláteis | | Vapor d'água | Vapor d'água + Ácido acético | Ácido acético + metanol + alcatrão leve | Alcatrão pesado | Alcatrão | - |
| Quantidade de voláteis | | Muito pequena | Pequena | Importante | Importante | Pequena | Muito pequena |

Fonte – DOAT E PETROFF (1975), citados por ALMEIDA e REZENDE, 1982. p. 144.

Alguns aspectos térmicos da carbonização são descritos por VIVACQUA FILHO et al. (1982), tais como a influência da temperatura, da taxa de aquecimento e da pressão. O controle desses fatores exerce influência não só no rendimento do processo, como também nas propriedades físicas e químicas do produto a ser obtido. A Tabela 3.8 apresenta a variação do teor de carbono fixo no produto obtido em relação à temperatura de carbonização.

Tabela 3.8 – Variação da composição elementar e rendimento do processo de carbonização em função da temperatura

| Temperatura de carbonização (°C) | Composição elementar | | | Rendimento (%) |
|----------------------------------|----------------------|-----|------|----------------|
| | C | H | O | |
| 200 | 52,3 | 6,3 | 41,4 | 91 |
| 300 | 73,2 | 4,9 | 21,9 | 51 |
| 400 | 82,7 | 3,8 | 13,5 | 37 |
| 500 | 89,6 | 3,1 | 6,7 | 33 |
| 600 | 92,6 | 2,6 | 5,2 | 31 |
| 800 | 95,8 | 1,0 | 3,3 | 26 |
| 1.000 | 96,6 | 0,5 | 2,9 | 26 |

Fonte - WENZEL, 1970⁴, citado por MENDES et al., 1982. p. 84.

⁴ WENZEL, H. F. J. *Chemical technology of wood*, New York: Academic Press, 1970. 692 p.

O controle da pressão no sistema consiste em outro importante fator de influência no processo de carbonização. A Tabela 3.9 apresenta os resultados obtidos em um experimento de carbonização, em que se verifica o rendimento percentual em massa de um processo à pressão atmosférica e outro realizado em um recipiente hermeticamente selado, sob pressão.

Tabela 3.9 – Rendimento percentual em massa de processos de carbonização

| Temperatura de carbonização (°C) | Rendimento percentual em massa, base seca (%) | |
|----------------------------------|---|---|
| | Carbonização em recipiente sem pressão | Carbonização sob pressão, em recipiente hermeticamente selado |
| 160 | 98,0 | 97,4 |
| 180 | 88,59 | 93,0 |
| 200 | 77,10 | 87,7 |
| 220 | 67,50 | 86,4 |
| 240 | 50,79 | 83,0 |
| 260 | 40,22 | 82,5 |
| 280 | 36,16 | 83,8 |
| 300 | 31,77 | 78,7 |
| 320 | 29,66 | 79,1 |

Fonte - VIOLETTE, 1951, citado por VIVACQUA FILHO et al., 1982. p. 72.

Os mesmos autores obtiveram rendimentos crescentes na produção de alcatrão, à medida que a temperatura aumentava, quando o sistema era operado a uma pressão inferior à pressão atmosférica.

O poder calorífico pode ser determinado experimentalmente pelo método ASTM D-240 (ABNT- MB 454), mediante queima da amostra em calorímetro, sob condições controladas. O calor da combustão é determinado com o auxílio das temperaturas observadas antes, durante e após a combustão, com as compensações devidas pela termoquímica e as correções referentes à transferência de calor. O poder calorífico superior corresponde ao calor liberado pela combustão da unidade de massa do combustível a um volume constante (volume da bomba), estando a água formada pela combustão no estado líquido. O poder calorífico inferior corresponde ao calor liberado pela combustão de uma unidade de massa do combustível, na pressão constante de 1 atmosfera, permanecendo a água formada na combustão no estado gasoso (TORREIRA, 1995).

A Tabela 3.10 indica o poder calorífico inferior (PCI) de alguns produtos utilizados como combustíveis.

Tabela 3.10 – Poder calorífico inferior de produtos utilizados como combustíveis sólidos

| Combustível | PCI (kcal/kg) | Combustível | PCI (kcal/kg) |
|-------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|
| Aparas de vinilo | 6.300 | Pó de tabaco | 2.300 |
| Bagaço de cana (20% água) | 3.200 | Casca de amêndoa dendê | 4.800 |
| Bagaço de cana (50% água) | 1.800 | Casca de babaçu | 4.000 |
| Bambu (10% água) | 3.700 | Semente de girassol (9,5% água) | 4.300 |
| Carvão de bambu | 7.000 | Casca de caju | 4.700 |
| Carvão Mineral Tubarão/SC | 4.500 | Sisal (11% água) | 3.400 |
| Carvão vegetal | 7.500 | Palha de amendoim (12% água) | 3.100 |
| Casca de algodão | 3.000 | Palha de trigo (20% água) | 3.200 |
| Casca de arroz (12% água) | 3.300 | Trapos de pano | 4.200 |
| Casca de cacau | 3.900 | Papel | 4.200 |
| Casca de café | 3.800 | Piche alcatrão | 8.600 |
| Casca de côco | 4.000 | Pó de linho | 4.000 |
| Fibras de palmeira (48% água) | 2.000 | Recortes de couro (14% água) | 4.400 |
| Fibras de palmito | 3.800 | Resíduos de juta | 3.800 |
| Filme de polietileno | 5.600 | Restos de borracha | 4.000 |
| Carvão mineral Cambui/PR | 6.200 | Serragem de pinho (40% água) | 2.000 |
| Carvão mineral Charqueadas/RS | 3.100 | Tecido náilon | 7.300 |
| Casca árvore | 2.200 | Casca de eucalipto | 3.750 |

Fonte – Adaptado de TORREIRA, (1995). p. 364.

Em virtude da dificuldade prática de se ter a composição química elementar do carvão vegetal, algumas equações e correlações utilizando-se a análise química imediata têm sido propostas e utilizadas para se determinar o poder calorífico. A fórmula de Goutal (equação (3.5)) permite calcular o poder calorífico superior (em kcal/kg) do carvão através da análise química imediata.

$$PCS = (82.Cf + A.V)$$

(3.5)

Em que:

PCS = Poder calorífico superior, em kcal/kg;

Cf = porcentual de carbono fixo, em %;

V = porcentual de matérias voláteis, em %;

A = coeficiente cujo valor depende da relação: $\frac{V}{V+C}$.

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

(3.6)

Na Tabela 3.11 são apresentados valores de A para diversas relações $\frac{V}{V+C}$.

Tabela 3.11 – Valores de A, em função da relação $\frac{V}{V+C}$.

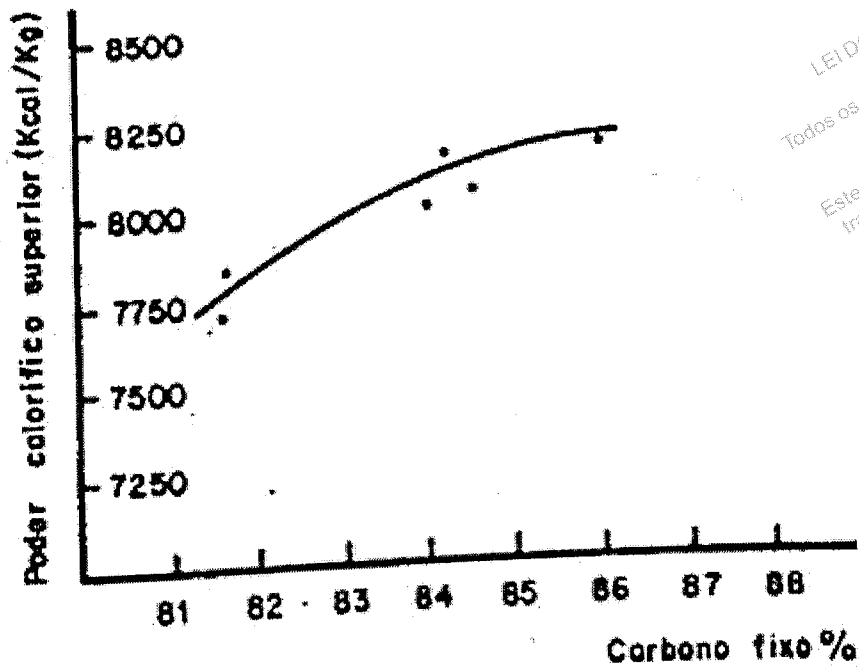
| $\frac{V}{V+C}$ | A |
|-----------------|-----|
| <0,05 | 150 |
| 0,05 | 145 |
| 0,10 | 130 |
| 0,15 | 117 |
| 0,20 | 109 |
| 0,25 | 103 |
| 0,30 | 96 |
| 0,35 | 89 |
| 0,40 | 80 |

Fonte - MENDES et al., 1982. p.87.

PETROFF e DOAT⁵, citados por MENDES et al. (1982), estudando carbonização de espécies tropicais e eucalipto, em escala de laboratório, fizeram correlações entre o poder calorífico superior em função do teor de carbono fixo, matérias voláteis e cinzas.

As Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam os resultados obtidos naquele estudo.

⁵ PETROFF, G.; DOAT, J. Pyrolyse des bois tropicaux: Influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. *Revue des Bois et Forêts des Tropiques*, v. 177, p. 51-64, jan.fev. 1978.



LEI DO DIREITO AUTORAL
 Todos os direitos reservados e protegidos
 pela Lei 9.610/1998.
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou
 transmitido sejam quais forem os meios
 empregados: eletrônicos, mecânicos,
 fotográficos ou quaisquer outros.

Figura 3.4 - Variação do poder calorífico em função do teor de carbono fixo

Fonte - PETROFF E DOAT citados por MENDES et al., 1982. p.87

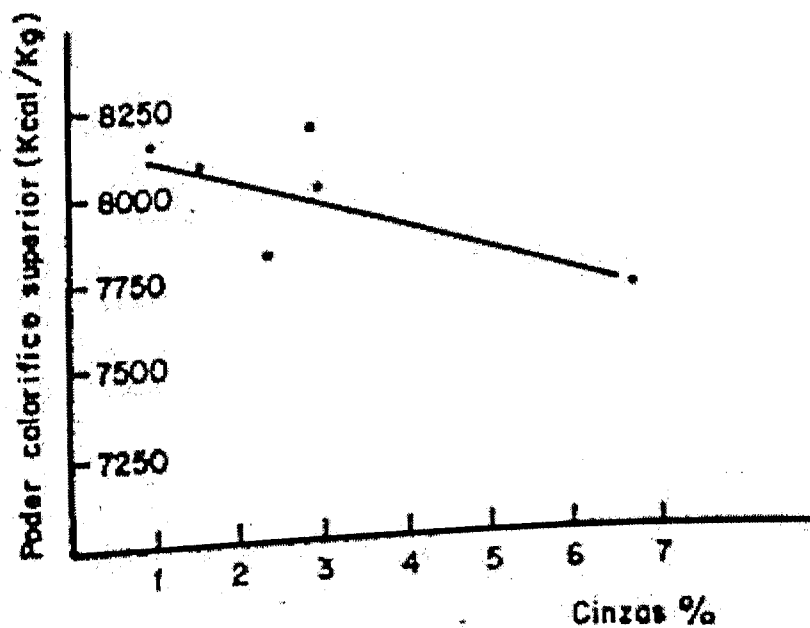
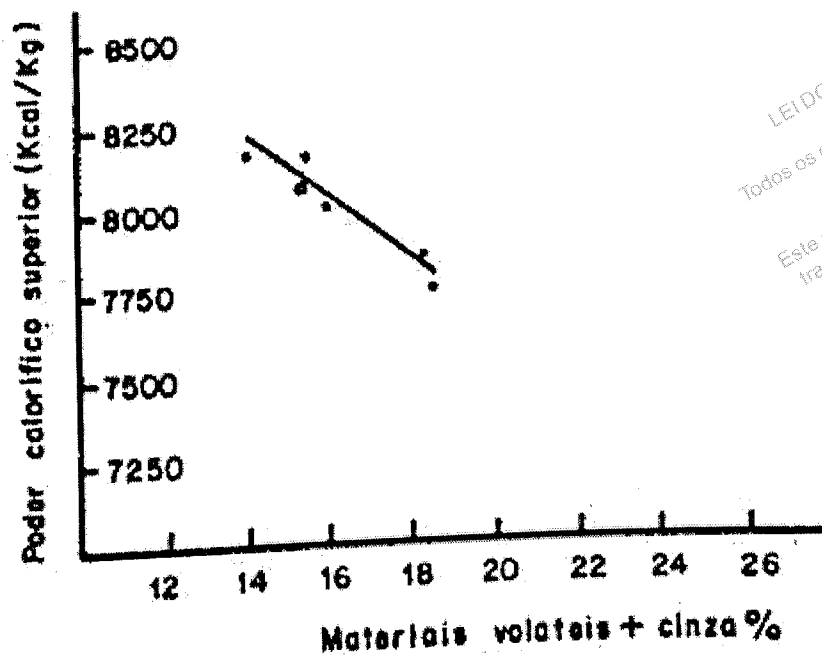


Figura 3.5 - Variação do poder calorífico superior em função do teor de cinzas

Fonte - PETROFF E DOAT (1978), citados por MENDES et al., 1982. p.88.



LEI DO DIREITO AUTORAL
 Todos os direitos reservados e protegidos
 pela Lei 9.610/1998.
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou
 transmitido sejam quais forem os meios
 empregados: eletrônicos, mecânicos,
 fotográficos ou quaisquer outros.

Figura 3.6 - Variação do poder calorífico em função do teor de cinzas + materiais voláteis

Fonte - PETROFF e DOAT (1978), citados por MENDES et al., 1982. p.88.

Esta correlação é de grande importância, uma vez que através da análise química imediata do carvão, para uma mesma espécie de madeira, pode-se obter um valor bem aproximado do poder calorífico superior do carvão produzido.

Estudos realizados na Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, publicados por MENDES et al. (1982), mostram que o poder calorífico do carvão vegetal varia com a temperatura de carbonização. Conforme Tabela 3.12 observa-se que o carvão produzido a 500 °C tem um poder calorífico maior do que os carvões produzidos a 300 e 700 °C, enquanto que o carvão produzido a 700 °C tem um poder calorífico maior do que o produzido a 300 °C. O aumento no poder calorífico do carvão produzido a 500 °C é explicado em função da sua composição química elementar. Observa-se na Tabela 3.8 (apresentada no item referente à composição química elementar do carvão) que o teor de oxigênio cai significativamente quando se passa de 300 °C para 500 °C.

Tabela 3.12 – Poder calorífico do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização*

| | | Temperatura de Carbonização | | |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------|--------|--------|
| | | 300 °C | 500 °C | 700 °C |
| Poder Calorífico (cal/g) | 1ª medida | 7012 | 8109 | 7647 |
| | 2ª medida | 7122 | 8141 | 7693 |
| | 3ª medida | 7085 | 8101 | 7563 |
| | 4ª medida | 6980 | 8199 | 7720 |
| | 5ª medida | 7151 | 8185 | 7671 |
| | MÉDIA | 7070 | 8147 | 7659 |
| Desvio Padrão | | 72 | 44 | 60 |
| Desvio Padrão (%) | | 1,02 | 0,54 | 0,78 |

*Carvão produzido a partir de *E. grandis*.

Fonte – Adaptado de MENDES et al., 1982. p.88.

A partir da equação (3.5), que permite calcular o poder calorífico superior e da Tabela 3.8, foram feitos os cálculos teóricos do poder calorífico superior (Tabela 3.13). Apesar de se tratar de madeiras de espécies diferentes, verifica-se, para ambas as espécies, que o poder calorífico passa por um máximo na faixa de temperatura próxima a 500 °C (Figura 3.8). Este comportamento foi também verificado em estudos realizados no CETEC pelo mesmo autor, carbonizando *E. grandis* de diversas idades nas temperaturas de 450, 550 e 700 °C.

Tabela 3.13 – PCS calculado a partir da análise elementar do carvão e da equação (3.3)

| Temperatura de carbonização (°C) | Poder calorífico inferior * (kcal/kg) | Poder calorífico superior ** (kcal/kg) |
|----------------------------------|---------------------------------------|--|
| 200 | 3.618,8 | - |
| 300 | 6.664,5 | 7.070 |
| 400 | 7.416,9 | - |
| 500 | 8.026,9 | 8.147 |
| 600 | 8.061,6 | - |
| 700 | - | 7.659 |
| 800 | 7.959,5 | - |
| 1000 | 7.871,3 | - |

* Calculado a partir da análise química elementar e da relação $\frac{V}{V+C}$

** Determinado em bomba calorimétrica (CETEC).

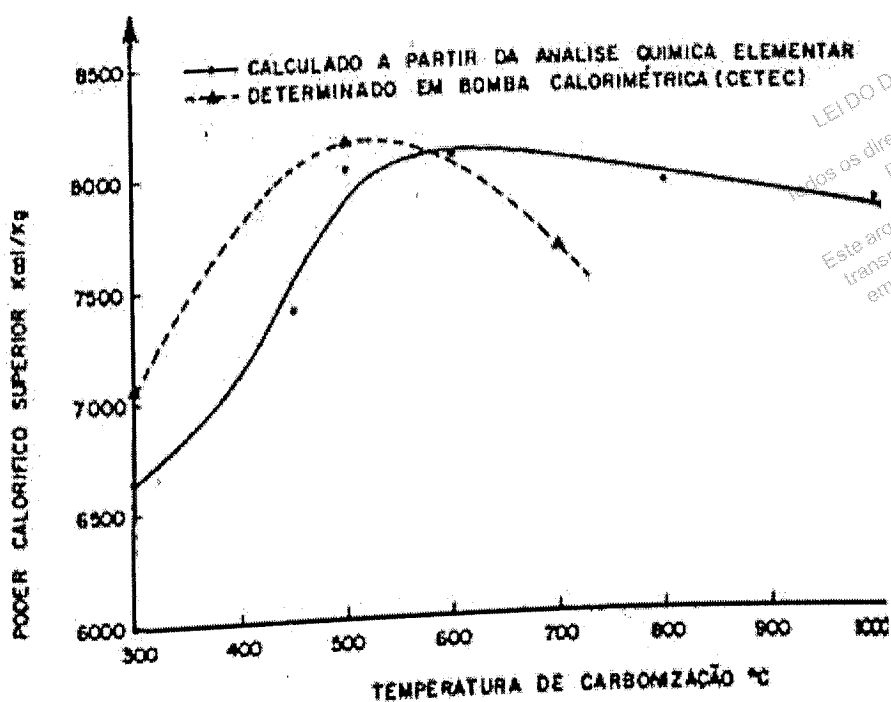


Figura 3.7 – Variação do PCS em função da temperatura de carbonização

Fonte - MENDES et al., 1982. p.88.

3.3 Torrefação da madeira e derivados

Como um meio alternativo de uso, queimar madeira para geração de energia dificilmente pode tornar-se uma sugestão revolucionária. No entanto, podem ser identificados dois caminhos, nos quais as pesquisas sobre essa forma de combustão direta pode ser relevante. A primeira, quando a madeira foi descartada como lixo, seja em um contexto doméstico, industrial ou mesmo nas florestas. A segunda consiste na pesquisa de soluções aplicáveis à transposição de uma das maiores limitações enfrentadas para o reaproveitamento de resíduos mais robustos, que é uma forma viável de manejo (EVANS, 2001).

Propostas envolvendo a melhoria do poder calorífico dos derivados de madeira encontram-se em estudo em todo o mundo, proporcionando o uso de variadas técnicas de combustão. Estudos conduzidos por TILLMAN e GOLD (1996) e TILLMAN (2000), avaliaram técnicas de mistura de diferentes combustíveis sólidos, visando o aumento do poder calorífico dos resíduos de madeira utilizados em plantas de geração de energia. A técnica denominada "cofiring" – descrita pelos autores – ou "combustão simultânea", envolve a mistura de dois combustíveis sólidos, no caso madeira e carvão mineral, visando um aumento do poder

calorífico, para utilização em diversas proporções da mistura. Deve-se ressaltar as implicações ambientais decorrentes do uso do carvão mineral, relacionadas às emissões de óxidos de enxofre, além de problemas operacionais decorrentes da mistura e alimentação de fornalhas com materiais de densidade e granulometria diferentes. A otimização da co-geração de energia utilizando resíduos de madeira foi também estudada por EVANS e ZARADIC (1996), em turbinas.

Os estudos realizados visam, até então, resolver uma série de impasses relacionados aos fatores que envolvem o aproveitamento da madeira e seus derivados, tais como:

- padronizar as dimensões dos materiais de forma a facilitar o manejo e dar uniformidade ao comportamento das partículas sólidas durante o processo de combustão;
- reduzir o teor de umidade e higroscopicidade presentes na madeira e seus derivados;
- incrementar o poder calorífico;
- otimizar o rendimento dos processos até então aplicados à madeira e seus derivados, visando a obtenção de combustíveis;
- minimizar os efeitos da ação dos agentes biológicos que atacam a madeira, deteriorando sua qualidade durante o período de estocagem.

Surge nesse contexto, o processo de torrefação da madeira, que é descrito por diversos autores tais como PENTANANUNT et al. (1990), KANDPAL e MAHESHWARI (1992), LIPISNKY et al. (2002) e ARCATE (2002), como uma técnica promissora desenvolvida na França pelo pesquisador Jean Paul Bourgeois na década de 80, visando a obtenção de um produto que concentrasse maior quantidade de energia em relação à matéria-prima que o originou, no caso a lenha, com o mínimo de perda de energia. O carvão vegetal tradicionalmente obtido nos processos é considerado como um produto que encerra perdas energéticas elevadas, apresentando baixo rendimento em relação ao processo proposto. Não só a França, mas outros grupos de pesquisa são apontados como centros de desenvolvimento de produtos obtidos com técnicas de torrefação, tais como a Tailândia (Asian Institute of Technology, Bangkok), a Finlândia e até mesmo o Brasil (Grupo de Combustíveis Alternativos – Universidade de Campinas – São Paulo). ARCATE (2002), relaciona algumas patentes registradas na França, de processos envolvendo métodos de obtenção de produtos de torrefação de madeira, no

período compreendido entre os anos de 1985 e 1990. Técnicas utilizando combustão simultânea de lenha torrada e carvão, em usinas termoelétricas nos Estados Unidos, também são relatadas pelo autor, ressaltando detalhes de alimentação dos dois combustíveis separadamente ou em conjunto.

As vantagens descritas pelos autores pesquisados, do material obtido com a torrefação, um produto intermediário entre madeira e carvão vegetal, compreendem:

- Rendimento superior ao processo de carbonização convencional, uma vez que conserva entre 80 e 90% da energia contida na matéria-prima original (madeira);
- Poder calorífico mais elevado que a matéria-prima original, no caso a madeira;
- Baixa higroscopicidade, com o teor de umidade sendo estabilizado em no máximo 3%, após o processo de torra;
- Resistência a agentes biológicos durante a estocagem.

LIPINSKY et al. (2002), apresentam o processo de torrefação da madeira ocorrendo a uma faixa de temperatura entre 200 °C e 280 °C (fase endotérmica). O rendimento do processo proporciona uma perda de massa de 20% a 30%, retendo de 80% a 90% da energia contida na matéria-prima original. A Tabela 3.14 evidencia as características do produto obtido.

Tabela 3.14 – Características da madeira após torrefação (*Pinus sp*)

| Parâmetros | Resultados | |
|---|------------|------|
| Rendimento energético (na madeira seca) | 77% | |
| Poder calorífico (kcal/kg) | 5.710 | |
| Cinzas (%) | 0,55 | |
| Voláteis (%) | 71,9 | |
| Carbono fixo | 27,7 | |
| Análises elementares | C (%) | 59,7 |
| | H (%) | 5,6 |
| | N (%) | 0,25 |
| | O (%) | 32,9 |

Fonte – Adaptado de LIPINSKY et al., 2002. p. 1.

O processo de torrefação da madeira é descrito por ARCATE (2002) em três etapas distintas, compreendendo:

- secagem, com utilização de vapor superaquecido e exaustão de condensados;
- torrefação, com utilização de vapor superaquecido e recuperação dos voláteis como combustível auxiliar no processo;
- resfriamento através de ventilação de ar, visando a não ocorrência de mecanismos de combustão espontânea, com o teor de umidade estabilizado em torno de 3%. O processo determina uma perda de massa em torno de 20 a 30%, possibilitando uma conservação da energia do produto inicial na faixa entre 80 e 90%.

ARCATE (2002) apresenta a utilização do vapor superaquecido como uma inovação importante, frente a outros processos de torrefação, como a utilização da circulação de ar quente. O autor indica algumas etapas do processo, ocorrendo à medida que há elevação da temperatura e dos tempos de detenção do material, como sendo:

- até 160 °C, há predominância das reações envolvendo a perda da umidade, sem contudo haver modificações estruturais na madeira, particularmente quanto à absorção de umidade (higroscopicidade);
- entre 180 ° e 220 °C, fase em que a madeira começa a adquirir uma coloração amarronzada e perde umidade, com grande emissão de dióxido de carbono, ácido acético e alguns fenóis;
- acima de 220 °C, até 270 °C, fase em que ocorre o processo de torrefação (ponto de torra), em que o material adquire as características específicas da "madeira torrificada".

BOURGEOIS e DOAT, citados por ARCATE (2002), estudaram a influência da temperatura no processo de torrefação em várias espécies, nas características do produto obtido. Os resultados são apresentados na Tabela 3.15. A influência da temperatura e do tempo de torra são apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.15 - Características da madeira torrada

| | | Espécie | | | | |
|---------------------------|--|----------------|-------------------------------|---------------|----------------------|------|
| | | Pinus pinaster | Castanea sativa + Quercus sp. | Pinus caribea | Eucalyptus urophylla | |
| Resultados da torrefação | Temperatura atingida (°C) | 280 | 270 | 285 | 275 | |
| | Rendimento (%) | 77 | 77 | 76 | 74 | |
| | Análise elementar | C (%) | 59,7 | 56,8 | 58,6 | 57,2 |
| | | H(%) | 5,6 | 5,2 | 5,5 | 5,1 |
| | | N (%) | 0,25 | 0,45 | 0,15 | 0,15 |
| | | O (%) | 32,9 | 36,2 | 35,3 | 37,2 |
| | PCI da madeira seca (kcal/kg) | 4581 | 4270 | 4629 | 4438 | |
| | PCI da madeira termoprocessada (Kcal/Kg) | 5406 | 5143 | 5346 | 5418 | |
| Rendimento energético (%) | 90,8 | 92,7 | 87,8 | 90,3 | | |

Fonte – Adaptado de ARCATE. 2002. p. 22 – 26.

Tabela 3.16 - Influência do tempo de processamento na torrefação da madeira

| Tempo de processamento | Parâmetros avaliados | Temperatura (°C) | | | |
|------------------------|----------------------|------------------|------|-------|------|
| | | 200 | 230 | 260 | 270 |
| 1 hora | Rendimento % | | | 86,50 | |
| | Carbono fixo% | | | 24,3 | |
| | PCI (kcal/kg) | | | 5260 | |
| 1,5 horas | Rendimento % | 94,3 | 90,9 | 82,5 | 79,5 |
| | Carbono fixo% | 20,2 | 22,7 | 26 | 28 |
| | PCI (kcal/kg) | 4904 | 5145 | 5201 | 5397 |
| 2 horas | Rendimento % | 96,7 | 89,0 | 83,5 | |
| | Carbono fixo% | 20,4 | 21,6 | 28,5 | |
| | PCI (kcal/kg) | 4850 | 5043 | 5325 | |
| 2,5 horas | Rendimento % | 92,6 | 88,8 | 82,5 | |
| | Carbono fixo% | 21,7 | 24,5 | 28,5 | |
| | PCI (kcal/kg) | 5012 | 5194 | 5330 | |
| 3 horas | Rendimento % | 93,5 | 86,6 | 82,0 | 69,0 |
| | Carbono fixo% | 21,5 | 28,3 | 29,1 | 32 |
| | PCI (kcal/kg) | 4942 | 5215 | 5440 | 5540 |

Fonte - Adaptado de ARCATE, 2002. p. 22 – 26.

O autor assegura que a utilização de vapor superaquecido na secagem e torrefação, bem como o aproveitamento dos voláteis na torrefação como combustível auxiliar, proporciona uma substancial economia da energia desprendida no processo. Durante a etapa de secagem, a madeira com o teor de umidade em torno de 35%, tem a umidade reduzida para 5%. (ARCATE, 2002).

LIPINSKY et al. (2002), em pesquisas sobre torrefação de madeira e derivados, afirmaram que o tamanho das partículas tem um papel importante no processo, uma vez que esse parâmetro é determinante quanto ao tempo de detenção. Acredita-se que a cinética das reações varia das partículas finas do tipo dos materiais obtidos por fragmentação da madeira (cavacos) para os pedaços maiores, como as toras.

A diminuição do teor de umidade no material a ser encaminhado ao processo de torrefação, também é influenciado pela granulometria das partículas. JIRJIS (1995), apresenta em seus estudos as considerações sobre a perda de umidade em partículas de madeira na forma de cavacos e na madeira em toras, sendo que nas primeiras a velocidade é consideravelmente maior que na segunda.

Em outra linha de pesquisa, BOURGEOIS e DOAT, citados por ARCATE (2002), apresentam um tipo de produto derivado da madeira, submetido ao processo de torrefação, no qual o material é prensado e adquire uma densidade em torno de 800 kg/m³, na forma de briquetes. LIPINSKY et al. (2002) apresentam fluxos de processos de torrefação de madeira ocorrendo em reatores contínuos ou em bateladas. Os autores indicam que os melhores rendimentos de processo encontram-se associados a processos contínuos de produção, com utilização de vapor superaquecido na secagem e torrefação da madeira, com aproveitamento dos voláteis como combustível auxiliar.

O processo de torrefação da madeira, diante das características do produto obtido e do rendimento verificado, tem sido considerado como uma alternativa promissora para a utilização da madeira como combustível. Após o processo, o produto obtido possui baixa higroscopicidade, baixo teor de umidade, maior resistência ao ataque de agentes biológicos durante a estocagem e poder calorífico mais elevado que o material original. A redução da dimensão das peças a serem submetidas ao processo de torrefação, reduz o tempo de processamento, a temperaturas que variam entre 200 °C e 270 °C. O tempo de secagem também se encontra relacionado às dimensões das peças a serem tratadas.

3.4 Adaptação de fornalhas para utilização de combustíveis alternativos derivados de madeira

Toda a técnica aplicada sobre a construção de uma fornalha vislumbra as condições ideais de combustão. Em geral, verifica-se em uma fornalha uma zona de radiação e outra de convecção. Na câmara de combustão, os combustíveis devem transformar-se em gases de combustão, os quais deverão permutar calor com as superfícies projetadas para a ocorrência da troca térmica. Sempre se atribui a uma boa combustão, a condição de se obter os seguintes requisitos (DINIZ, 1981):

- Turbulência, proporcionando a íntima combinação do oxigênio com o combustível. Nos combustíveis líquidos e gasosos, essa situação é facilmente atingida pela atomização. Para combustíveis sólidos, deve-se maximizar a sua área superficial de modo a poder atingir tal turbulência;
- Tempo, referindo-se à duração da combustão, ou seja, o tempo de residência ou permanência na fornalha. Uma partícula atingirá total combustão se permanecer tempo suficiente em contato com o oxigênio, o que lhe permitirá completar a combustão, ou seja, para que todos os seus elementos combustíveis (carbono, hidrogênio, enxofre, etc) se transformem em gases de combustão;
- Temperatura, constituindo-se em parâmetro relevante no dimensionamento da câmara de combustão, uma vez que se atribui à temperatura o papel mais importante na transmissão de calor.

TORREIRA (1995), determina as seguintes premissas para a otimização do uso de combustíveis nas fornalhas:

- Obtenção de uma combustão completa do combustível queimado, com o máximo desprendimento de calor;
- Fornecimento da mínima quantidade de ar para realização da combustão.

Levando-se em consideração a busca pelo atendimento das condições ótimas na aplicação de um combustível sólido derivado de resíduos de madeira, pode-se inferir que:

- Uma melhor condição de turbulência pode ser atingida com a utilização de partículas menores, com o conseqüente aumento da área superficial. Essa condição pode ser adequada através de processos mecânicos de fragmentação dos resíduos de madeira;

- Menores tempos de detenção poderão ser adotados no dimensionamento das fornalhas, para partículas sólidas de menor tamanho. O tempo de permanência na fornalha também poderá ser reduzido com a eliminação da umidade do combustível aplicado;

- O emprego de técnicas para elevação do poder calorífico dos combustíveis deverá proporcionar maiores temperaturas no interior da fornalha, com o conseqüente ganho na transmissão de calor.

Existem, atualmente, inúmeras fontes estacionárias, tais como fornos e caldeiras, funcionando com combustíveis fósseis, os quais atingiram um custo operacional tal que se torna vantajosa a procura por uma solução alternativa. Como os processos de conservação de energia possuem seus limites, a eterna busca da viabilidade técnica e econômica é apresentada sempre na forma de uma dessas soluções (PINHEIRO, 1992):

- Modificação da tecnologia dos processos, eliminando a necessidade de geração de energia térmica;
- Substituição de equipamentos de geração de energia por outros projetados para a utilização de fontes energéticas alternativas;
- Adaptação dos equipamentos existentes nos processos, para utilização de outras fontes energéticas.

Das três soluções, a que tem se apresentado de forma mais econômica tem sido a terceira. Cabe salientar no entanto, que nos estudos realizados por PINHEIRO (1992), constatou-se que a adaptação de equipamentos existentes para a queima de combustíveis sólidos provoca uma queda na produção das fornalhas entre 40 e 50%, devido à necessidade da permanência da partícula sólida por um tempo maior dentro da fornalha, para que se possa completar a combustão, levando a utilização de baixas taxas de liberação de energia. FONTENELE (1974), POWER (1976), MORIS (1979) e LOPES (1980), citados por PINHEIRO (1992), mostram em seus trabalhos as condições necessárias para que uma fornalha projetada para uso de combustível líquido possa funcionar queimando combustível sólido após as adequações.

DINIZ (1981) apresenta um estudo de caso da conversão de combustível de uma caldeira a óleo com capacidade de produção de vapor de 4.000 kg/h, à pressão de trabalho de 8 kgf/cm² para queima de lenha em toras. Trata-se de um exemplo escolhido de um equipamento de porte mediano para uso em escala industrial. (Adaptado de DINIZ, 1981):

Dados gerais:

Evaporação: 4.000 kg/h

Pressão de trabalho: 8 kg/cm²

Temperatura do vapor: saturado

Temperatura da água de alimentação: 60 °C

Temperatura dos gases de exaustão: 275 °C

Consumo de combustível: 292,2 kg de óleo/hora

PCS/PCI: 10.445/9886 kcal/kg

Excesso de ar: 20%

Para conversão do equipamento para queima de lenha em toras, observou-se as características construtivas e operacionais do sistema. O equipamento possui fornalha circular interna com diâmetro de 700 mm e comprimento de 3.400 mm, o que proporciona uma superfície de aquecimento (SA) da fornalha de 7,5 m², onde se realiza a combustão, com volume de 1,31 m³. Parte do calor produzido é perdido nos gases de exaustão.

A quantidade de calor pode ser fornecida pela expressão:

(3.8)

$H_i = PCI \times WF$, em que:

H_i = quantidade de calor desenvolvido pelo combustível, em kcal/h;

PCI = poder calorífico inferior, em kcal/kg;

WF = consumo de combustível, em kg/h;

Aplicando-se a equação, obtém-se:

$$H_i = 9886 \times 292,2$$

$$H_i = 2.888.689,2 \text{ kcal/h}$$

O calor produzido na caldeira pode ser obtido pela equação:

$$H_0 = E \times (I_v - I_A)$$

Em que:

H_0 = calor produzido na caldeira, em kcal/h;

E = evaporação da caldeira, em kg/h;

I_v = entalpia do vapor, em kcal/kg (obtido nas tabelas de vapor saturado);

I_A = entalpia da água de alimentação, em kcal/kg;

Aplicando-se a equação ao exemplo, obtém-se:

$$H_0 = 4000 (662 - 60) = 2.408.000 \text{ kcal/h}$$

Conforme observado, cerca de 83% do calor desenvolvido pelo combustível é absorvido na caldeira (rendimento) e transformado em vapor. Para que se processe a queima de lenha em toras na fornalha, com PCS = 3050 kgcal/kg, 40% de umidade e 40% de excesso de ar, deve-se aplicar:

$$WF = \frac{H_0}{\frac{R_T}{100} \times PCS} \quad (3.10)$$

Em que:

WF = consumo de combustível, kg/h;

H_0 = calor produzido na caldeira, em kcal/h;

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros. (3.9)

R_T = rendimento térmico, em %;

PCS = poder calorífico superior, em kcal/kg.

Aplicando-se a equação (3.9), com o rendimento térmico percentual sendo estimado pela Tabela 3.5, obtém-se:

$$WF = \frac{2.408.000 \text{ kcal/h}}{\frac{68,7}{100} \times 3050 \text{ kcal/kg}}$$

$$WF = 1.149,21 \text{ kg/h}$$

Segundo DINIZ (1981), deve-se limitar a liberação de calor na fornalha a uma taxa em torno de 300.000 kcal/m³.h. Assim sendo o volume de fornalha adaptada para queima de lenha pode ser fornecido pela equação:

$$V = \frac{WF \times PCS}{300.000 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h}} \quad (3.11)$$

Em que:

V = volume da fornalha, em m³;

WF = consumo de combustível, kg/h;

PCS = poder calorífico superior, em kcal/kg.

Aplicando-se a equação (3.10), obtém-se:

$$V = \frac{1149,21 \text{ kg/h} \times 3050 \text{ kcal/kg}}{300.000 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{h}}$$

$$V = 11,68 \text{ m}^3$$

Como pode ser verificado, a fornalha adaptada para queima de lenha em toras deverá possuir um volume aproximadamente nove vezes maior que a fornalha para queima de óleo. Por essa

razão, utiliza-se nas adaptações, via de regra, a instalação de uma ante-fornalha ou pré-fornalha, ou seja, acrescenta-se uma câmara de combustão adicional que proporcione as condições para combustão da lenha.

Outros fatores considerados por DINIZ (1981) para que na adaptação não ocorra perda de capacidade de produção encontram-se relacionadas ao escoamento dos gases de exaustão, vazão dos gases e perdas de cargas associadas. Como a combustão de lenha deverá impor maior vazão de gases de exaustão em relação ao óleo, as perdas de carga na tiragem dos gases poderão limitar a capacidade de produção. Assim sendo, todo o sistema de exaustão deverá ser redimensionado para que não sejam verificadas velocidades dos gases nos dutos de exaustão superiores a 15 m/s (DINIZ, 1981).

3.5 Impactos ambientais associados à combustão dos derivados de madeira

O Conselho Estadual de Política Ambiental, órgão colegiado deliberativo, estabeleceu através da Deliberação Normativa nº 11, em 16 dezembro de 1986 (DN 011/86), as normas e padrões para emissões de poluentes na atmosfera no estado de Minas Gerais, em fontes estacionárias. Para "caldeiras a lenha", a DN 011/86 estabeleceu o padrão de 200 mg/Nm³, enquanto que para caldeiras a biomassa o padrão estabelecido é de 600 mg/Nm³, como limites de emissão de material particulado. Para fontes não listadas na resolução, o padrão estabelecido é de 150 mg/Nm³ de material particulado.

Como biomassa, a DN 011/86 especifica alguns combustíveis sólidos, tais como o bagaço de cana, os resíduos de beneficiamento de cereais, aglomerados de madeira e outros resíduos de matéria orgânica permitidos (Deliberação Normativa nº 11, COPAM, 1986).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, através da Resolução nº 08, de 06 de dezembro de 1990, estabeleceu, em nível nacional, os limites máximos de emissão de poluentes do ar em fontes fixas de poluição. A Resolução nº 08 define como processo de combustão em fontes fixas toda a queima de substâncias combustíveis realizada em caldeiras, geradores de vapor, centrais para geração de energia elétrica, fornos, fornalhas, estufas, secadores para geração e uso de energia térmica, incineradores e gaseificadores (Resolução nº 08, CONAMA, 1990).

A verificação do atendimento aos padrões estabelecidos para emissão de partículas, poderá ser realizada por campanhas de amostragens isocinéticas nos dutos de exaustão das fontes estacionárias, com o emprego de metodologias nas coletas e análises, preconizadas em normas técnicas tais como:

- NBR 10.700 – Planejamento de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias (ABNT, 1989);
- NBR 10.701 – Determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias (ABNT, 1989);
- NBR 10.702 – Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação do peso molecular em base seca (ABNT, 1989);
- NBR 12.020 – Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Calibração dos equipamentos utilizados em amostragem (ABNT, 1992);
- NBR 12.827 – Efluentes gasosos com sistema filtrante no interior do duto ou chaminé de fontes estacionárias – Determinação de Material Particulado (ABNT, 1993).

De acordo com as orientações da norma técnica NBR 10.700 (ABNT, 1989), tornam-se necessárias algumas informações preliminares no planejamento das medições, tais como:

- as características do ciclo operacional;
- as matérias-primas utilizadas nos processos e suas características gerais;
- o tipo de combustível utilizado;
- a produção;
- as características do fluxo gasoso;
- a geometria do duto ou chaminé e sua localização;
- a verificação das dimensões internas do duto ou chaminé;

- a determinação da quantidade de furos para amostragem e suas posições;
- a definição da equipe de trabalho.

O estudo preliminar do efluente gasoso fornece informações básicas para viabilizar a amostragem. Os seguintes parâmetros, segundo a norma técnica NBR 10.700 (ABNT, 1989) devem ser observados:

- as condições de fluxo, verificando se não há ocorrência de fluxo ciclônico;
- as pressões de velocidade, verificando se a máxima e mínima são compatíveis com o manômetro do equipamento;
- a temperatura, verificando o perfil da temperatura na seção transversal e sua variação num mesmo ponto;
- a pressão estática;
- a umidade estimada no fluxo gasoso, bem como a existência de névoas ou gotículas;
- a composição dos gases no fluxo;
- a concentração de material particulado, associando-a com o tempo e vazão de amostragem, para evitar excesso de troca de filtros ou quantidade insuficiente de material particulado para pesagem;
- a possibilidade de entupimento ou aumento de perda de carga no trem de amostragem, devido à concentração ou natureza do material particulado.

Para seleção da seção transversal, onde serão determinados os pontos de amostragem, a norma técnica NBR 10701 (ABNT, 1989) preconiza que deverá ser escolhida em um trecho reto a uma distância de pelo menos 8 diâmetros a jusante e 2 diâmetros a montante de duas singularidades consecutivas, tais como curvas, joelhos, reduções, expansões, chama visível, etc. Caso essa condição seja impraticável, deverá ser selecionada uma seção transversal que esteja a pelo menos 2 diâmetros a jusante e 0,5 diâmetro a montante (NBR 10701, ABNT 1989).

MESQUITA et al. (1985), define os aerossóis ou aerodispersóides como sistemas dispersos cujo meio de dispersão é gasoso e cuja fase dispersa consiste de partículas sólidas ou líquidas, classificando os sistemas de acordo com as fases como:

- poeiras – aerossóis formados por dispersão e constituídos por partículas sólidas geralmente com diâmetros superiores a 1 μm , tais como as poeiras de sílica, asbesto, algodão, etc;
- névoas – aerossóis constituídos por partículas líquidas, independentemente da origem e do tamanho das partículas, tais como as névoas de ácido sulfúrico, névoas de pintura, dentre outras;
- fumos – aerossóis formados pela condensação, sublimação, ou reações químicas, constituídos por partículas sólidas geralmente com diâmetros menores que 1 μm , tais como os fumos metálicos, fumos de cloreto de amônio, dentre outros;
- fumaças – aerossóis resultantes da combustão incompleta de materiais orgânicos, constituídos geralmente por partículas inferiores a 1 μm .

Além do material particulado, a combustão da biomassa produz outros poluentes tais como o monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio (FEAM, 2003). A Tabela 3.17 apresenta alguns poluentes atmosféricos decorrentes da combustão de biomassa e suas principais consequências associadas.

LEI DE DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sem a permissão expressa do
empregado. eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

Tabela 3.17- Poluentes atmosféricos e principais consequências associadas

| Poluentes | Consequência |
|------------------------|---|
| Monóxido de carbono | . Afeta a capacidade de oxigenação da hemoglobina; . Danos ao aparelho respiratório. |
| Óxidos de enxofre | . Danos à vegetação; . Danos à saúde humana; . Chuvas ácidas. |
| Óxidos de nitrogênio | . Danos à vegetação; . Chuvas ácidas; . Reagem com hidrocarbonetos, produzindo oxidantes fotoquímicos (danos à saúde humana). |
| Dióxido de carbono | . Efeito estufa. |
| Material particulado | . Redução da visibilidade. . Acúmulo de sujeira; . Carreamento de poluentes tóxicos para o trato respiratório. |
| Oxidantes fotoquímicos | . Irritação de olhos e pulmões; . Danos à vegetação; . Deterioração da borracha e produtos sintéticos. |

Fonte – Adaptado de FEAM, 2003. p. 155

Os óxidos de nitrogênio são formados em todos os processos de combustão com utilização do ar e são altamente nocivos à saúde. Inicialmente produz-se o óxido de nitrogênio e gradualmente este gás combina-se com o oxigênio atmosférico para formar o dióxido de nitrogênio (MANCINTYRE, 1988).

Pode-se procurar diminuir o teor dos óxidos de nitrogênio nas emissões provenientes das caldeiras pela ação nos combustores, reduzindo o “ar em excesso” na combustão, mas de modo que não aumente, em contrapartida, a quantidade de fumaça, ou seja, de material particulado no fluxo gasoso (MANCINTYRE, 1988).

A qualidade da combustão encontra-se estreitamente relacionada ao controle operacional e afeta de forma direta a emissão de poluentes. Dessa forma, recursos mecânicos que proporcionam ao operador, calibrar a relação combustível/comburente são essenciais ao controle das emissões. O controle da combustão (razão ar/combustível) não pode ser realizado através do controle da vazão de combustível, uma vez que a energia gerada pela caldeira (vazão de vapor), depende da quantidade de combustível introduzido. Assim, a única variável que pode ser regulada é a vazão de ar de combustão. O excesso de ar é fator determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Um grande excesso de ar é indesejável, porque diminui a temperatura da chama e

aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes, reduzindo a eficiência térmica. Por outro lado, um baixo excesso de ar pode resultar em uma combustão incompleta e maiores concentrações no fluxo gasoso de material particulado e monóxido de carbono, podendo em alguns casos, possibilitar a acumulação de combustível não queimado, causando risco de explosão. A diminuição do excesso de ar possui um efeito sobre a redução das emissões de óxidos de nitrogênio, mas abaixo de certo limite, a emissão de material particulado aumenta consideravelmente (PINHEIRO,1995).

Os impactos ambientais provenientes da combustão podem também ser avaliados em função da modificação das características dos combustíveis, através de processos que possibilitem a melhoria da performance quanto à emissão de poluentes durante a queima. Nessa linha de pesquisa, PENTANANUNT et al. (1990), realizaram experimentos em uma unidade de torrefação de madeira, em pequena escala, com circulação de ar quente, visando avaliar qualitativamente a intensidade das emissões durante a queima e as características do produto obtido quanto à umidade, composição elementar, carbono fixo e teor de cinzas, em comparação à madeira seca ao ar e carvão vegetal. As tabelas 3.18 e 3.19 apresentam os resultados obtidos em base seca e base úmida, após o processamento do produto.

Tabela 3.18 - Características do produto obtido com o processo de torrefação de madeira em comparação com a madeira seca ao ar e carvão vegetal (base úmida)

| | | Tempo de processo (h) | Temperatura (°C) | Umidade (%) | Matriz volátil (%) | Carbono fixo (%) | Cinzas (%) | |
|-------------|---------------------|-----------------------|------------------|-------------|--------------------|------------------|------------|------|
| Combustível | Madeira Torrificada | 2 | 250 - 260 | 4,00 | 66,47 | 28,55 | 0,98 | |
| | | 2 | 260 - 270 | 3,80 | 62,85 | 32,36 | 0,98 | |
| | | 3 | 250 - 260 | 3,50 | 65,71 | 30,24 | 0,54 | |
| | | 3 | 260 - 270 | 3,20 | 65,71 | 30,24 | 0,65 | |
| | Madeira seca ao ar | | | | 11,25 | 69,80 | 18,20 | 0,74 |
| | Carvão vegetal | | | | 5,8 | 31,90 | 59,90 | 2,40 |

Fonte - Adaptado de PENTANANUNT et al. 1990. p. 1.175

UFMG - Biblioteca Universitária
Coleção Memória Intelectual

Tabela 3.19 - Composição elementar do produto obtido com o processo de torrefação da madeira em comparação com a madeira seca ao ar e carvão vegetal

| | | | | Composição elementar | | | | PCI ⁶ (kcal/kg) |
|-------------|---------------------|-----------------------|------------------|----------------------|-----|-------|-----------|-------------------------------|
| Combustível | Madeira torreficada | Tempo de processo (h) | Temperatura (°C) | C | H | O | N | |
| | | | | | | 2 | 250 – 260 | 59,98 |
| | | 2 | 260 – 270 | 60,98 | 5,1 | 32,69 | 0,21 | 5284 |
| | | 3 | 250 – 260 | 63,44 | 5,1 | 30,72 | 0,18 | 5567 |
| | | 3 | 260 - 270 | 64,37 | 5,0 | 29,80 | 0,18 | 5647 |
| | Madeira seca ao ar | | | 51,91 | 6,1 | 41,00 | 0,10 | 4536 |
| | Carvão vegetal | | | 82,16 | 3,3 | 11,90 | 0,10 | 7271 |

Fonte – Adaptado de PENTANANUNT et al. 1990. p. 1.177

Os autores compararam o rendimento do processo de torrefação em massa e energia, utilizando cavacos de madeira e briquetes de serragem prensados. A tabela 3.20 apresenta os resultados obtidos para os dois materiais em diferentes faixas de temperatura e tempos de processamento.

Tabela 3.20 - Rendimento em massa e energia do processo de torrefação em cavacos de madeira e briquetes de serragem

| Processo de torrefação | | Combustível | | | |
|------------------------|------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | | Cavacos de madeira | | Briquetes de serragem | |
| Tempo de processo (h) | Temperatura (°C) | Rendimento em massa (%) | Rendimento em energia (%) | Rendimento em massa (%) | Rendimento em energia (%) |
| 2 | 250 – 260 | 83,13 | 84,61 | 93,80 | 95,25 |
| 2 | 260 – 270 | 78,13 | 89,64 | 86,61 | 88,59 |
| 3 | 250 – 260 | 76,64 | 85,11 | 87,08 | 92,55 |
| 3 | 260 - 270 | 66,67 | 76,53 | 76,31 | 83,13 |

Fonte – Adaptado de PENTANANUNT et al. 1990. p. 1.177

⁶ Calculado a partir da equação (3.5), em que $PCI = \left(\frac{\%C}{100} \times 8100 \right) + \frac{34000}{100} \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right)$

A comparação entre as características da madeira torrificada com o carvão vegetal e a madeira seca ao ar demonstraram que o material obtido com o processo de torrefação consiste em um produto intermediário entre a madeira e o carvão, levando a um aumento da concentração de carbono, em função de alterações químicas na sua composição, além da significativa perda de umidade. (PENTANANUNT et al., 1990)

Na segunda fase dos experimentos, PENTANANUNT et al. realizaram testes de combustão com cavacos de madeira torrificadas, carvão vegetal e madeira seca ao ar, avaliando qualitativamente as características da combustão dos produtos durante o período de queima, bem como a densidade da fumaça emitida através de um teste de fumaça tipo "Bacharach". A metodologia foi aplicada em conformidade com a norma ASTM Standard D 2158-80. O procedimento consistiu basicamente da queima de 200 g de cada combustível em um recipiente metálico de seção quadrada, com dimensões de 50 cm x 50 cm, com 70 cm de altura. A ignição dos combustíveis foi realizada através do acendimento de uma cápsula com 30 ml de metanol. O ar foi insuflado mecanicamente através de um leito de seixos. O aparato experimental encontra-se representado na Figura 3.9.

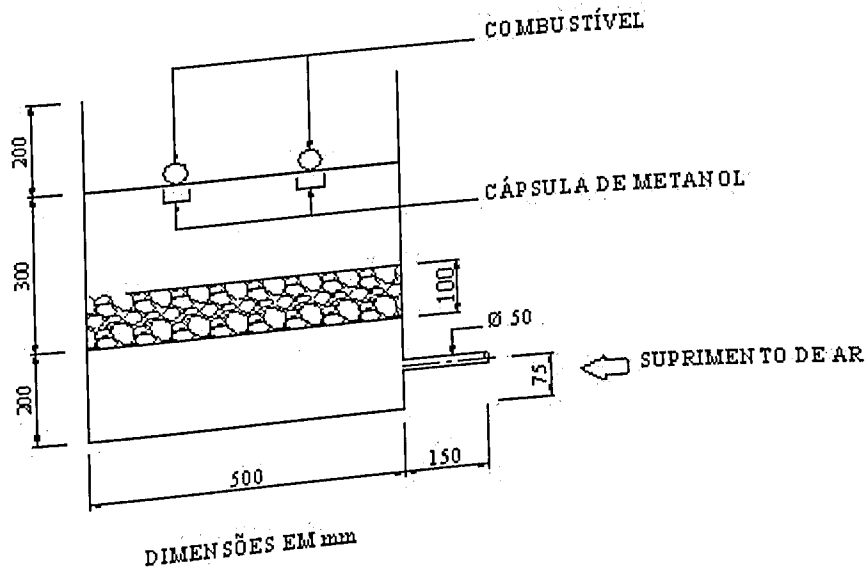


Figura 3.8 - Aparato experimental para teste de combustão

Fonte - PENTANANUNT et al., 1990. p.1176.

As emissões provenientes da combustão dos produtos foram captadas por uma coifa e encaminhadas por um tubo de exaustão a um filtro de papel, para visualização da intensidade da tonalidade impressa no filtro, pelas emissões de cada combustível. A pressão negativa necessária para vencer as perdas de carga foi proporcionada por uma bomba experimental de pistão.

Os filtros de papel foram comparados a uma escala padrão, estando os resultados obtidos nas observações do período de combustão e no teste de fumaça, representados respectivamente na Figura 3.9 e Tabela 3.21.

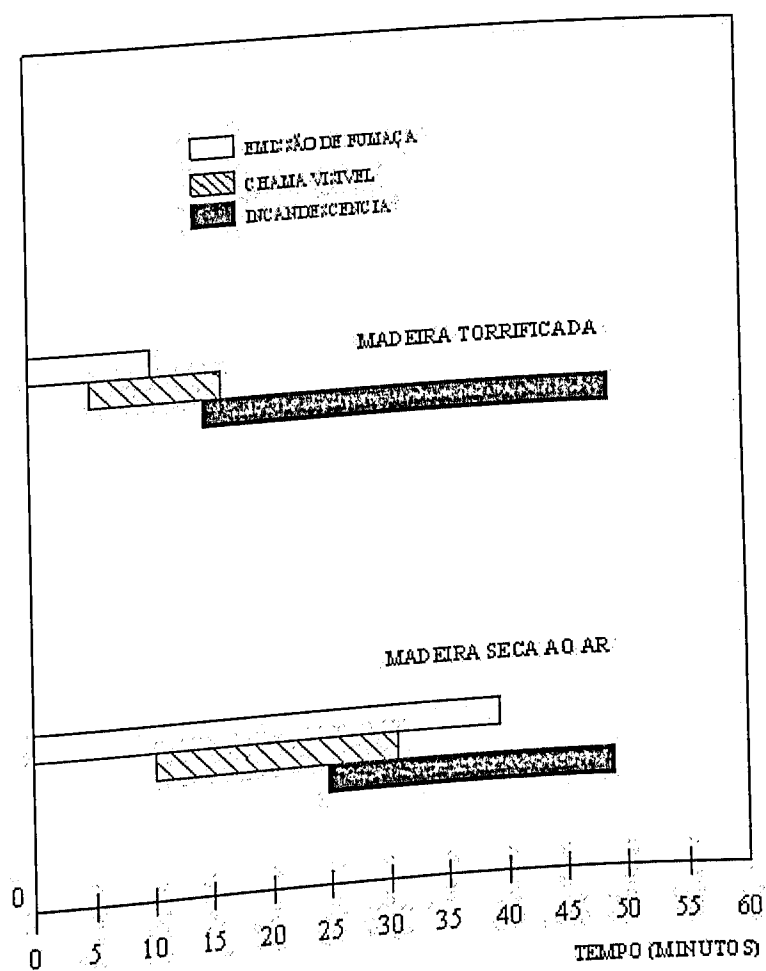


Figura 3.9 - Características da combustão em função do tempo de queima

Fonte - PENTANANUNT et al., 1990. p.1178.

Tabela 3.21 - Emissão de fumaça dos diferentes combustíveis no teste de queima

| Combustível | Nº na Escala | Performance da emissão |
|---------------------|--------------|---------------------------------|
| Carvão vegetal | 1 | Marca de fuligem insignificante |
| Madeira torrificada | 3 | Marca de fuligem tênue |
| Madeira seca ao ar | 6 | Marca de fuligem intensa |

Fonte - PENTANANUNT et al., 1990. p.1178.

Os resultados obtidos levaram os autores a concluir que o processo de torrefação proporciona uma combustão mais limpa, com menor período de emissão de fumaças, menor densidade de fumaça e menor concentração de material particulado nas emissões, em relação à madeira seca ao ar. (PENTANANUNT et al., 1990).

A grande variedade na composição dos resíduos de madeira, no entanto, não permite que as pesquisas estejam limitadas a avaliações relativas à concentração de material particulado nas emissões provenientes da combustão desses resíduos. Resíduos de madeira originários de materiais que foram submetidos a processos industriais que envolvem tratamento com substâncias orgânicas e inorgânicas devem ser avaliados em relação a outros parâmetros.

Nessa linha de pesquisa, SKODRAS et al. (2004) estudaram o aproveitamento de resíduos de madeira contaminados com aditivos orgânicos em mistura com outros combustíveis sólidos em processos de combustão. Foram avaliadas as partículas retidas no sistema de controle de poluição (coletor centrífugo tipo multiciclone) e as emissões provenientes da combustão. Os experimentos foram desenvolvidos em um gerador de vapor em escala real, de uma unidade industrial de processamento de madeira para fabricação de painéis do tipo "MDF" ("Medium Density Fibreboards"), localizada no noroeste da Grécia (PINDOS S.A.⁷). Foram avaliadas diversas misturas contendo lenha, postes de madeira, resíduos de MDF e lignito⁸. A tabela 3.22 apresenta as várias proporções de mistura dos combustíveis avaliados.

⁷ Unidade industrial no noroeste da Grécia de processamento de madeira para produção de painéis do tipo MDF – Medium Density Fibreboards (PINDOS S.A.)

⁸ Segundo FERREIRA (1980), lignito consiste em um tipo de carvão mineral formado sobretudo por plantas da idade terciária, árvores de folhas caducas, coníferas, palmeiras, cicadáceas, etc. O mesmo que lenhito.

Tabela 3.22 - Combustíveis utilizados nas avaliações e campanhas de amostragem

| Combustível | Simbologia | Porcentagem em massa (%) |
|---------------------------------|------------|--------------------------|
| Lenha/ Lignito | (a) | 80/20 |
| Lenha/ Lignito | (b) | 60/40 |
| Lenha | (c) | 100 |
| MDF | (d) | 100 |
| MDF/Lignito | (e) | 80/20 |
| Lenha/Lignito/Postes de madeira | (f) | 60/20/20 |
| Lenha/ Lignito /MDF | (g) | 60/20/20 |
| MDF/ Lignito /Postes de madeira | (h) | 60/20/20 |
| MDF | (i) | 100 |

Fonte – SKODRAS et.al., (2004). p. 3.

As avaliações incluíram análises dos gases provenientes da exaustão na chaminé do gerador de vapor, quanto aos parâmetros monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx) e dióxido de enxofre (SO₂), além das campanhas de amostragem para verificação das concentrações de PCDD/F⁹ nas emissões e cálculos dos fatores de equivalência de toxicidade¹⁰ para verificação do atendimento aos limites da legislação ambiental. Os resíduos de MDF sem mistura foram analisados em duplicidade.

A Tabela 3.23 apresenta os resultados das análises dos gases provenientes da combustão das diversas misturas de combustíveis.

⁹ PCDD/F – dibenzo-p-dioxinas policloradas e dibenzofuranos policlorados.

¹⁰ Fator de equivalência de toxicidade (FET) de substâncias para expressá-las como 2,3,7,8 – tetraclorodibenzeno-p-dioxina (2,3,7,8 – TCDD), especificados pela NTO/CCMS – North Treaty Organization's – Comitee on Challenges of Modern Society.

Tabela 3.23- Análises dos gases das misturas de combustíveis

| Combustível ¹¹ | Razão de equivalência ¹² | Emissões (mg/Nm ³ , 6 vol% O ₂) | | |
|---------------------------|-------------------------------------|--|-----|-----------------|
| | | CO | NO | SO ₂ |
| (a) | 2.123 | 249 | 552 | 58 |
| (b) | 2.215 | 245 | 596 | 173 |
| (c) | 2.243 | 206 | 690 | 53 |
| (d) | 2.221 | 273 | 627 | 48 |
| (e) | 2.164 | 176 | 613 | 51 |
| (f) | 2.148 | 256 | 550 | 72 |
| (g) | 2.218 | 247 | 670 | 56 |
| (h) | 2.197 | 198 | 529 | 55 |

Fonte – SKODRAS et.al., (2004). p. 5.

Observou-se que as concentrações de monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio não sofreram alterações significativas, sendo que o dióxido de enxofre apresentou uma concentração significativamente maior quando a proporção do lignito na mistura (carvão mineral) chegou a 40%. A tabela 3.24 apresenta os resultados referentes às concentrações de dioxinas e furanos. Na tabela 3.25 encontram-se dispostos os resultados relativos à concentração de metais no fluxo gasoso (medidos na fase gasosa e partículas finas).

Tabela 3.24 - Concentração de dioxinas e furanos no fluxo gasoso proveniente da queima de diversas proporções de mistura de combustíveis

| Combustíveis ¹³ | PCDD/F | |
|----------------------------|-----------------------------|---|
| | Total (pg/Nm ³) | FET ¹⁴ (pg/Nm ³) |
| (a) | 10.671 | 97,3 |
| (b) | 10.202 | 47,1 |
| (c) | 7.802 | 38,3 |
| (d) | 5.238 | 54,7 |
| (e) | 748 | 3,0 |
| (f) | 7.282 | 82,8 |
| (g) | 6.801 | 71,2 |
| (h) | 894 | 6,2 |
| (i) | 4.718 | 71,9 |

Fonte – SKODRAS et al. (2004). p. 5.

¹¹ Simbologia de mistura de combustíveis - Tabela 3.22.

¹² Razão de equivalência obtida através da razão entre a relação ar/combustível medida e a relação ar/combustível obtida pela relação estequiométrica.

¹³ Simbologia da mistura de combustíveis - Tabela 3.22.

¹⁴ Fator de Equivalência de Toxicidade.

Tabela 3.25 - Concentração de metais nas emissões provenientes da queima de diversas misturas de combustíveis

| Metais | Concentração de Metais nas emissões dos Combustíveis ($\mu\text{g/g}$) ¹⁵ | | | | | | | |
|--------|--|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) |
| Sn | 42,5 | 44,4 | 13,7 | 14,4 | 17,0 | 18,5 | 20,6 | 11,7 |
| Zn | 868,0 | 1421,5 | 1053,4 | 1236,3 | 648,6 | 1136,4 | 441,2 | 1272,9 |
| Pb | 32,5 | 49,1 | 45,5 | 29,0 | 20,2 | 29,6 | 17,5 | 41,8 |
| Cd | 4,1 | 4,8 | 2,2 | 3,2 | 2,5 | 2,6 | 1,9 | 3,4 |
| Co | 4,3 | 4,4 | 1,9 | 4,3 | 2,9 | 2,8 | 2,3 | 3,1 |
| Ni | 15,3 | 20,5 | 22,9 | 20,4 | 9,5 | 11,5 | 8,0 | 12,3 |
| Mn | 1,2 | 0,8 | 6,2 | 4,0 | 1,3 | 3,1 | 2,4 | 2,8 |
| Cr | 44,3 | 43,0 | 17,1 | 44,4 | 10,5 | 8,7 | 10,3 | 9,4 |
| V | 12,6 | 19,6 | 2,4 | 15,5 | 24,2 | 18,3 | 36,6 | 52,1 |
| Cu | 88,7 | 75,9 | 83,0 | 58,3 | 61,1 | 67,6 | 61,7 | 146,7 |
| Ag | 6,4 | 9,0 | 0,7 | 3,0 | 0,9 | 0,7 | 0,7 | 1,0 |
| Sb | 10,1 | 3,3 | 3,0 | 3,8 | 2,6 | 3,7 | 3,1 | 4,8 |

Fonte – SKODRAS et.al., (2004). p. 6.

Os autores concluíram que, para todas as misturas, houve atendimento aos limites estabelecidos para emissão de dioxinas e furanos, considerando o valor estabelecido pela legislação ambiental de 100 pg/Nm^3 . Os pontos de coleta foram instalados após o equipamento coletor de pó centrífugo tipo multiciclone.

Os resíduos sólidos provenientes da combustão dos resíduos de madeira têm sido objeto de estudos que visam uma avaliação dos impactos ambientais decorrentes da sua disposição. TURNBULL (1992), avaliando a viabilidade técnica e ambiental da utilização desses resíduos como combustíveis em plantas de geração de energia na Califórnia, Estados Unidos, apresenta como vantagem o fato da combustão da biomassa gerar entre 1 e 2% de resíduos para disposição (cinzas) após a combustão, contra 8% deixados pelo carvão mineral. Os estudos desenvolvidos pelo autor indicam uma demanda crescente desses resíduos para disposição em solos de cultivo agrícola no período compreendido entre 1981 e 1990. (TURNBULL, 1992).

SKODRAS et al. (2004) analisou onze metais componentes das cinzas e fuligens provenientes da combustão de diversas misturas de combustíveis, com resíduos de madeira, no cinzeiro da

¹⁵ Simbologia da tabela de combustíveis – Tabela 3.22.

fornalha e nas partículas finas retidas no equipamento de controle ambiental¹⁶. As Tabelas 3.26 e 3.27 apresentam os resultados das análises.

Tabela 3.26 - Concentração de metais nas cinzas provenientes da queima de diversas misturas de combustíveis

| Metais | Concentração de Metais nas cinzas dos Combustíveis (µg/g) ¹⁷ | | | | | | | |
|--------|---|----------|--------|--------|---------|---------|----------|----------|
| | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) |
| Sn | 41,8 | 220,8 | 32,6 | 75,8 | 29,4 | 63,3 | 255,5 | 208,3 |
| Zn | 128,8 | 212,9 | 40,9 | 102,5 | 38,1 | 138,2 | 96,3 | 98,2 |
| Pb | 18,6 | 14,7 | 51,6 | 111,2 | 56,6 | 26,5 | 38,8 | 88,8 |
| Cd | 5,3 | 21,2 | 8,4 | 8,7 | 3,9 | 7,0 | 27,0 | 19,9 |
| Co | 11,1 | 19,6 | 10,1 | 21,3 | 8,1 | 13,2 | 51,0 | 22,9 |
| Ni | 83,4 | 208,8 | 86,5 | 242,8 | 61,9 | 103,2 | 540,4 | 227,6 |
| Fe | 4367,9 | 22.057,3 | 2892,3 | 8599,0 | 3.250,4 | 6.323,2 | 27.872,4 | 21.436,1 |
| Mn | 5,1 | 0,83 | 3,2 | 3,6 | 4,0 | 3,5 | 1,2 | 1,6 |
| Cr | 128,2 | 222,7 | 53,4 | 235,6 | 46,2 | 122,7 | 350,7 | 272,0 |
| V | 17,3 | 190,0 | 99,5 | 26,9 | 15,2 | 38,2 | 132,4 | 136,1 |
| Cu | 71,6 | 62,7 | 80,0 | 68,6 | 60,5 | 88,5 | 62,5 | 140,7 |

Fonte – SKODRAS et.al., (2004). p. 7.

Tabela 3.27 - Concentração de metais na fuligem proveniente da queima de diversas misturas de combustíveis

| Metais | Concentração de Metais na fuligem dos Combustíveis (µg/g) ¹⁸ | | | | | | | |
|--------|---|----------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) |
| Sn | 34,8 | 118,2 | 91,8 | 65,4 | 47,2 | 42,9 | 128,4 | 63,2 |
| Zn | 50,8 | 126,7 | 87,1 | 378,1 | 237,6 | 401,6 | 311,2 | 397,6 |
| Pb | 36,6 | 38,0 | 30,9 | 38,2 | 28,4 | 55,8 | 43,3 | 39,6 |
| Cd | 7,1 | 16,6 | 12,4 | 13,9 | 8,2 | 8,1 | 15,4 | 10,0 |
| Co | 8,1 | 14,0 | 13,6 | 17,5 | 11,8 | 12,0 | 27,0 | 19,9 |
| Ni | 116,0 | 135,1 | 130,6 | 215,8 | 176,8 | 127,9 | 373,9 | 207,8 |
| Fe | 3.234,9 | 13.171,4 | 9.342,1 | 7.173,2 | 5.350,9 | 4.793,5 | 13.410,4 | 7.435,4 |
| Mn | 4,1 | 3,5 | 3,9 | 4,5 | 3,3 | 3,9 | 2,5 | 3,6 |
| Cr | 58,4 | 132,6 | 107,9 | 119,2 | 87,9 | 61,3 | 171,6 | 117,9 |
| V | 175,2 | 91,8 | 75,4 | 76,1 | 296,2 | 109,7 | 208,3 | 354,7 |
| Cu | 73,2 | 61,4 | 61,4 | 75,0 | 59,7 | 144,3 | 85,8 | 176,5 |

Fonte – SKODRAS et.al., (2004). p.7.

¹⁶ Coletor de pó tipo multiciclone.

¹⁷ Simbologia da tabela de combustíveis – Tabela 3.22.

¹⁸ Simbologia da tabela de combustíveis – Tabela 3.22.

A disposição agrícola das cinzas e fuligem provenientes da combustão de lenha, em função de resultados obtidos em análises de composição básica, tem sido considerada satisfatória pelo órgão ambiental no estado de Minas Gerais (FEAM, 2003).

LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

4 METODOLOGIA

4.1 Considerações gerais

Para o estabelecimento de uma metodologia de avaliação do uso de resíduos de madeira para produção de um combustível alternativo foram selecionados alguns parâmetros, analisados de acordo com os diversos tratamentos aplicados aos resíduos em laboratório, além da proposição de um fluxograma para desenvolvimento do produto em escala industrial. O processamento consiste de duas etapas: beneficiamento mecânico e tratamento térmico.

Visando conferir uniformidade dimensional, melhor desempenho na combustão (melhor mistura ar/combustível) e maior facilidade operacional na alimentação automática das fornalhas, propõe-se o tratamento mecânico aplicado aos resíduos. Através da fragmentação das peças, com a utilização de um “picador rotativo a tambor” (Figura 4.1), as peças de madeira foram reduzidas a cavacos com tamanho médio de 2,5 centímetros de comprimento. A hipótese de que a redução das dimensões implica em maior facilidade na secagem da madeira também contribuiu para adoção do tratamento mecânico, possibilitando a proposição da supressão da etapa de secagem forçada da madeira precedendo o tratamento térmico, além da redução dos tempos de detenção nesta etapa. A existência no mercado, de vários fabricantes desses equipamentos, os quais proporcionam grande rendimento industrial na produção de cavacos de madeira, consiste de outro fator relevante a ser considerado na proposta.

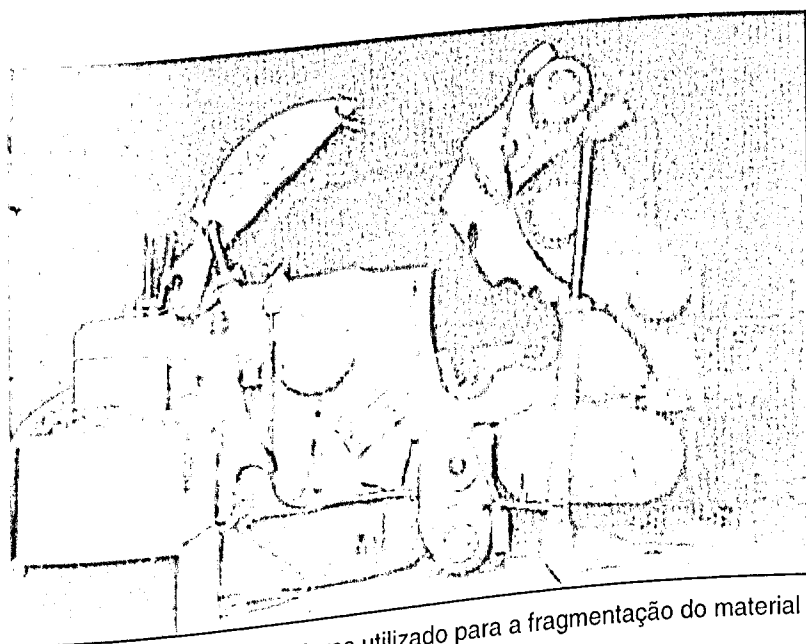


Figura 4.1 – Picador de toras utilizado para a fragmentação do material

Como segunda etapa do processamento, o tratamento térmico proposto é justificado por conferir ao produto características desejáveis a um combustível, tais como um poder calorífico satisfatório aos processos de produção, maior facilidade de automação na alimentação do combustível, uniformidade na taxa de liberação de energia térmica durante a combustão, além da expectativa da geração de impactos ambientais compatíveis com as exigências da legislação vigente. Dessa forma, fez-se necessário testar métodos com tempos de processamento mais curtos que os comumente descritos na bibliografia consultada, com menor dispêndio de energia térmica para obtenção do combustível alternativo, o que irá conseqüentemente acarretar uma maior viabilidade econômica em escala plena, em processos industriais com ciclos mais rápidos.

4.2 Estratégia de desenvolvimento dos trabalhos

Os resíduos a serem amostrados para os experimentos constituíram-se de resíduos de poda de árvores que chegam diariamente ao Aterro Sanitário de Belo Horizonte (Secretaria Municipal de Limpeza Urbana). O material lenhoso, normalmente disposto nas células de aterramento, foi encaminhado a um pátio descoberto nas dependências do aterro, separado da parte folhosa¹⁹. Esse material foi estocado durante 120 (cento e vinte) dias no pátio²⁰, seguindo-se a coleta das amostras para realização dos ensaios conforme o fluxograma da Figura 4.2.

¹⁹ A parte folhosa dos resíduos, bem como os galhos mais finos, são encaminhados normalmente a um triturador, seguindo a massa verde triturada para o processo de compostagem no aterro. Devido à grande variedade de espécies, não se julgou produtiva a identificação das espécies vegetais que participaram da composição da pilha de resíduos lenhosos.

²⁰ Período compreendido entre 10 de setembro de 2003 e 08 de janeiro de 2004.

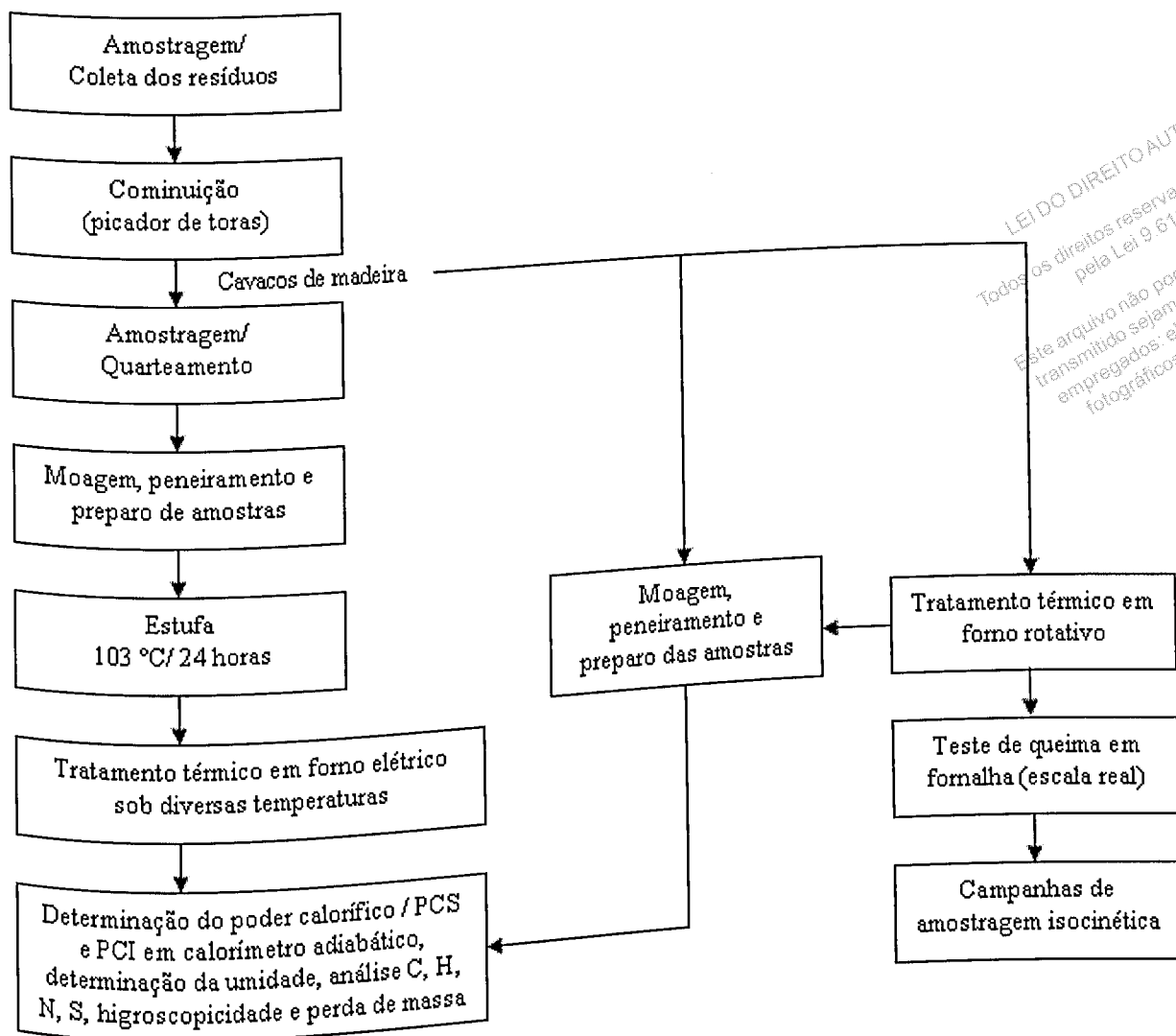


Figura 4.2 - Fluxograma de desenvolvimento dos trabalhos

4.3 Preparo do material lenhoso – tratamento mecânico dos resíduos

RASMUSSEN (1968), citado por GALVÃO e JANKOWSKY (1985), indica alguns procedimentos para amostragem de cargas de madeira. Para volumes de até 47 m³ devem ser retiradas no mínimo quatro amostras em diferentes locais das pilhas. Para volumes acima de 236 m³, seria satisfatória a retirada de 10 a 12 amostras. Entretanto, para composições heterogêneas, o número de amostras deverá ser aumentado.

A partir da coleta de 30 amostras com uso de moto-serra de 2.095 kg²¹ do volume total²² amostrado de 561,25 m³, o material foi encaminhado para um equipamento do tipo “picador rotativo a tambor”, localizado em Divinópolis – MG, na unidade industrial da FITED (Fiação e Tecelagem Divinópolis, em 8 de janeiro de 2004). O material foi acondicionado em sacos de rafia e foi realizada a pesagem do material picado, para transferência do produto para galpão coberto, nas dependências da empresa Engenho Nove Engenharia Ambiental Ltda, em Ribeirão das Neves – MG, região metropolitana de Belo Horizonte – MG.

A amostragem dos resíduos de madeira nas pilhas seguiu as recomendações contidas na Norma Técnica NBR 10.007 (ABNT, 1987) e orientações prescritas por RASMUSSEN, citado por GALVÃO e JANKOWSKY (1985).

4.4 Primeira fase do experimento – ensaios de laboratório

Do galpão, onde se encontravam os sacos com os resíduos processados mecanicamente (cavacos de madeira), foram amostrados 74 kg de cavacos dos sacos, procedido quartejamento e encaminhados 14 kg para o laboratório de Ensaio de Combustíveis da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, em 16 de janeiro de 2004.

O material amostrado foi submetido à moagem e peneiramento em peneira de 60 MESH, para ser submetido à secagem em estufa (105 °C) e tratamento térmico em mufla a diversas temperaturas, por um período de quinze minutos. O equipamento possuía dispositivo de aquecimento através de resistência elétrica, sendo submetido à calibração das temperaturas no interior da câmara antes da realização dos experimentos, tendo sido verificada a variação de até 6 °C no compartimento do forno, durante a calibração.

A secagem em estufa foi realizada até ocorrer a estabilização da umidade da massa (estabilização da massa aferida em balança analítica).

As amostras secas foram submetidas aos seguintes tratamentos:

²¹ Pesagem realizada na balança rodoviária da Fited – Cia Fiação e Tecelagem Divinópolis.

²² Medição executada pela Coordenação de Topografia do Aterro Sanitário de Belo Horizonte - SMLU.

1. Secagem em estufa a 105 °C
2. Tratamento térmico em mufla a 140 °C por 15 minutos;
 - Tratamento térmico em mufla a 180 °C por 15 minutos;
 - Tratamento térmico em mufla a 220 °C por 15 minutos;
 - Tratamento térmico em mufla a 260 °C por 15 minutos;
 - Tratamento térmico em mufla a 300 °C por 15 minutos.

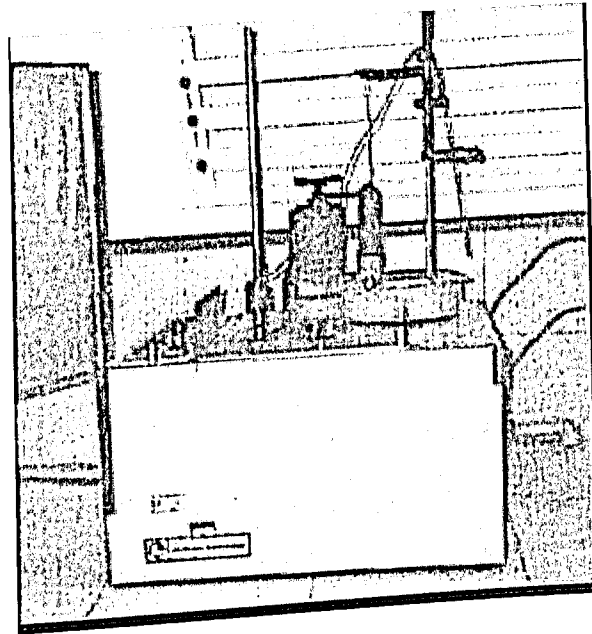
LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

O material, após preparo e separação das amostras por quarteamento, foi acondicionado em um recipiente de porcelana sem tampa, pesado em balança analítica e introduzido no forno elétrico. A colocação do recipiente no forno nos diversos tratamentos ocorreu quando o termômetro marcava as temperaturas indicadas no planejamento de cada etapa, permanecendo no interior da câmara por 15 minutos. Após cada período o material era retirado do compartimento aquecido e fechado com uma tampa de porcelana, para que se evitasse a ocorrência de combustão espontânea. Em seguida o material foi pesado em balança analítica e seguiu para os procedimentos relativos à análise do poder calorífico superior e inferior.

Para determinação do poder calorífico superior o material foi prensado em uma pastilha, de aproximadamente 1 g, pesado e introduzido em um calorímetro adiabático²³ (Figura 4.3) para que se processasse o ensaio, de acordo com as prescrições da norma ASTM 2015/96. Para determinação do poder calorífico inferior de acordo com a norma ASTM 2015/96, os ensaios foram realizados em um analisador do tipo C.N.H.S.²⁴ (Figura 4.4) onde ocorreram as determinações das concentrações percentuais dos elementos carbono, hidrogênio e nitrogênio, com o enxofre sendo determinado pela norma ASTM D-129-64.

²³ Calorímetro adiabático - Modelo 1241, n° de série 2774, fabricante: PARR INSTRUMENT COMPANY

²⁴ Analisador C.N.H.S. - Modelo 2400, série II, fabricante: PERKIN ELMER



LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

Figura 4.3 – Calorímetro adiabático utilizado na determinação do poder calorífico

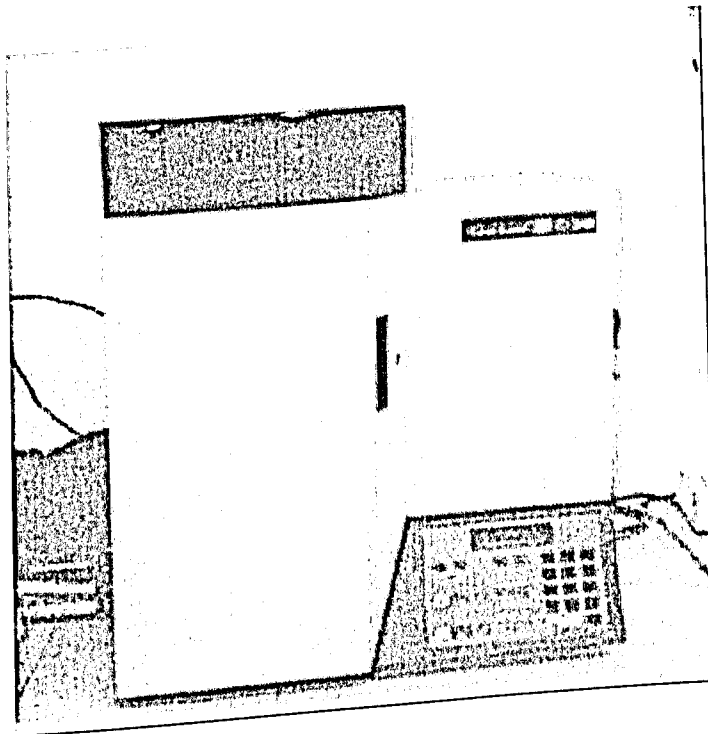


Figura 4.4 – Analisador CNHS

A diferença de umidade obtida nas amostras antes e após o tratamento aplicado na estufa seguiu as orientações da norma NBR 8112/83 da ABNT.

Para avaliação da higroscopicidade do material após a aplicação dos diversos tratamentos térmicos, as amostras (Figura 4.5) foram submetidas à pesagem 24, 48 e 72 horas após o

tratamento. Durante esse período, o material permaneceu dentro do laboratório, em recipiente aberto, em contato com o ambiente.

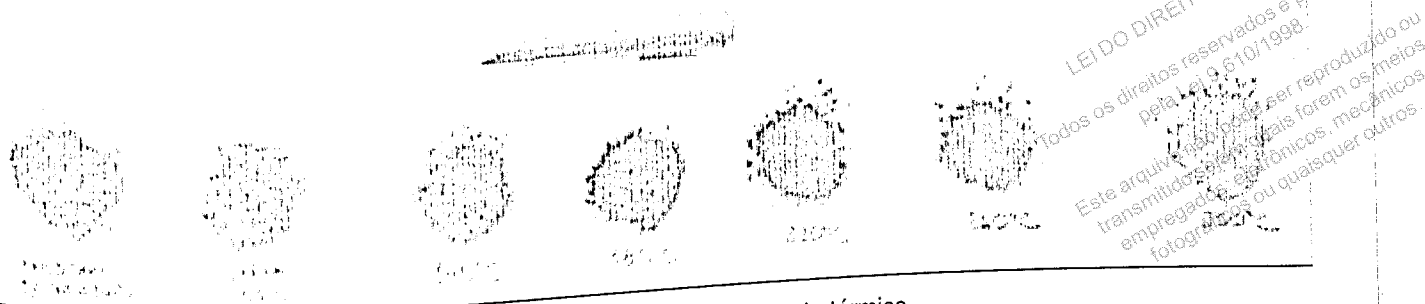


Figura 4.5 – Amostras após tratamento térmico

Após a verificação da perda de massa ocorrida em cada tratamento e observação visual das amostras na retirada dos materiais do forno, ficou evidente a ocorrência de reações exotérmicas (combustão), nas amostras submetidas aos tratamentos com temperaturas superiores a 220 °C. Diante dessas evidências, julgou-se necessário realizar uma nova bateria de ensaios, dessa vez com recipiente de porcelana levado ao forno com tampa.

De acordo com os resultados obtidos, avaliou-se a faixa de temperatura mais promissora para a aplicação do tratamento térmico em escala industrial e foram encaminhados mais 12 (doze) quilos do mesmo material estocado sob forma de cavacos ao CETEC. O material permaneceu estocado por 80 dias²⁵ em galpão coberto, com piso cimentado, em sacos de rafia sem fechamento.

O material amostrado foi submetido à moagem e peneiramento em peneira de 60 mesh, para serem separadas as amostras por quarteamento, para os diversos tratamentos a serem aplicados, antes da análise do poder calorífico superior e inferior. Após tratamento aplicado em estufa a 105 °C por 24 horas e determinação da umidade, as amostras foram submetidas a tratamento térmico por 15 minutos em mufla às temperaturas de 200 °C, 210 °C, 220 °C e 230 °C. O material foi acondicionado em recipientes de porcelana e introduzido na mufla fechado com tampa de porcelana. Após o tratamento térmico foi realizada a determinação do poder calorífico superior e poder calorífico inferior das amostras, além da determinação da higroscopicidade dos materiais em 24, 48 e 72 horas após os tratamentos térmicos, com a

²⁵ Período compreendido entre 08 de janeiro de 2004 e 29 de março de 2004.

utilização das mesmas metodologias e procedimentos aplicados nos primeiros ensaios laboratoriais. Visando a confirmação de resultados obtidos, alguns ensaios foram repetidos pelo laboratório de ensaios de combustíveis do CETEC.

O valor do poder calorífico superior (PCS) foi obtido experimentalmente em calorímetro adiabático, após obtenção do fator F da bomba; obtido por calibração, através da combustão do ácido benzóico.

A determinação do PCS é dada pela seguinte expressão:

$$PCI = \frac{T.F - e1 - e2 - e3}{m} \quad (4.1)$$

Em que:

PCS = Poder calorífico superior, em cal/g;

T = diferença entre as temperaturas obtidas no calorímetro, em °C;

F = constante da bomba;

e1 = mL de Na₂ CO₃ 0,0725 molar;

e2 = percentual de enxofre x 14, em %;

e3 = calorias consumidas no fio de ignição;

m = massa da amostra, em g.

A determinação do enxofre é realizada através da seguinte seqüência de operações:

- na água de lavagem da amostra, promove-se a adição de hidróxido de amônio a quente, filtrando-se os precipitados;
- adiciona-se como oxidante água de bromo procedendo-se uma acidificação para formação dos sulfatos;

- com adição de cloreto de bário, filtram-se os precipitados, encaminhando o filtro para a mufla, obtendo-se dessa forma a massa do sulfato de bário precipitado (M3 – M2);
- como o sulfato de bário possui 13,734% de enxofre em peso, obtém-se a concentração de enxofre através da expressão:

$$S \% = \frac{[(M3 - M2) \times 13,734]}{m}$$

Em que:

S % = percentual de enxofre na amostra, em %;

m = massa da amostra, em g (na análise do PCS);

M2 = massa do cadinho tarado, em g;

M3 = massa do cadinho com amostra, em g.

Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram obtidos através de leitura direta no aparelho C.H.N.S, onde são oxidadas quimicamente amostras em triplicata entre 1,5 e 2,0 g, com a temperatura sendo elevada a 900 °C. As médias obtidas de três leituras realizadas no aparelho, multiplicadas pelo fator de correção adotado pelo laboratório forneceram os resultados aplicados nas equações.

O poder calorífico inferior (PCI) é calculado após a obtenção do teor de hidrogênio, pela equação:

$$PCI = \frac{[(1,8 \times PCS) - (91,23 \times H)]}{1,8} \quad (4.3)$$

Em que:

PCI = poder calorífico inferior, em kcal/kg;

H % = percentual de hidrogênio, em %.

UFMG - Biblioteca Universitária
Coleção Memória Intelectual

4.5 Tratamento térmico em forno rotativo - ensaios em escala real

Essa etapa do experimento visou testar em escala real com utilização de um forno cilíndrico rotativo, o incremento do poder calorífico nos cavacos de madeira após a passagem do material pelo tratamento térmico. O tempo de 15 minutos adotado durante o processamento às diversas faixas de temperatura, foi escolhido com base em processos industriais de torrefação de outros produtos, com o mesmo tipo de equipamento utilizado no experimento. O sistema consiste basicamente em se alimentar com um aparato mecânico de transporte de granéis (elevador de canecos), uma moega posicionada acima do cilindro rotativo, mantendo-se na estrutura de processamento três cargas: uma na moega de alimentação, uma dentro do cilindro rotativo, submetendo-se ao tratamento térmico e a última carga já processada na peneira ventilada, sofrendo o resfriamento. O processo ocorre em bateladas, de forma semi-contínua.

Os cavacos de madeira estocados em galpão coberto e acondicionados em sacos de ráfia, foram submetidos a tratamento térmico em forno cilíndrico rotativo (Figuras 4.6 e 4.7) com aquecimento através de fornalha, com circulação de ar quente, utilizando lenha como combustível. As características do equipamento encontram-se especificadas a seguir:

- Tipo do forno: cilíndrico rotativo;
- Dimensões internas do cilindro: 1,20 m de diâmetro interno x 1,86 m de comprimento;
- Dimensões internas da fornalha: 1,00 m x 1,24 m x 0,62 m;
- Combustível: lenha;
- Troca térmica: circulação de ar quente;
- Ajuste do processo: válvulas tipo "borboleta" para controle de vazão de ar quente no interior do cilindro e externamente ao cilindro;
- Controle de temperatura: termômetro analógico - faixa de temperatura 0 - 500 °C;
- Alimentação do forno: mecânica, através de elevador de canecos;
- Resfriamento: ar forçado em peneira ventilada, com agitador mecânico de pás (Figura 4.8);

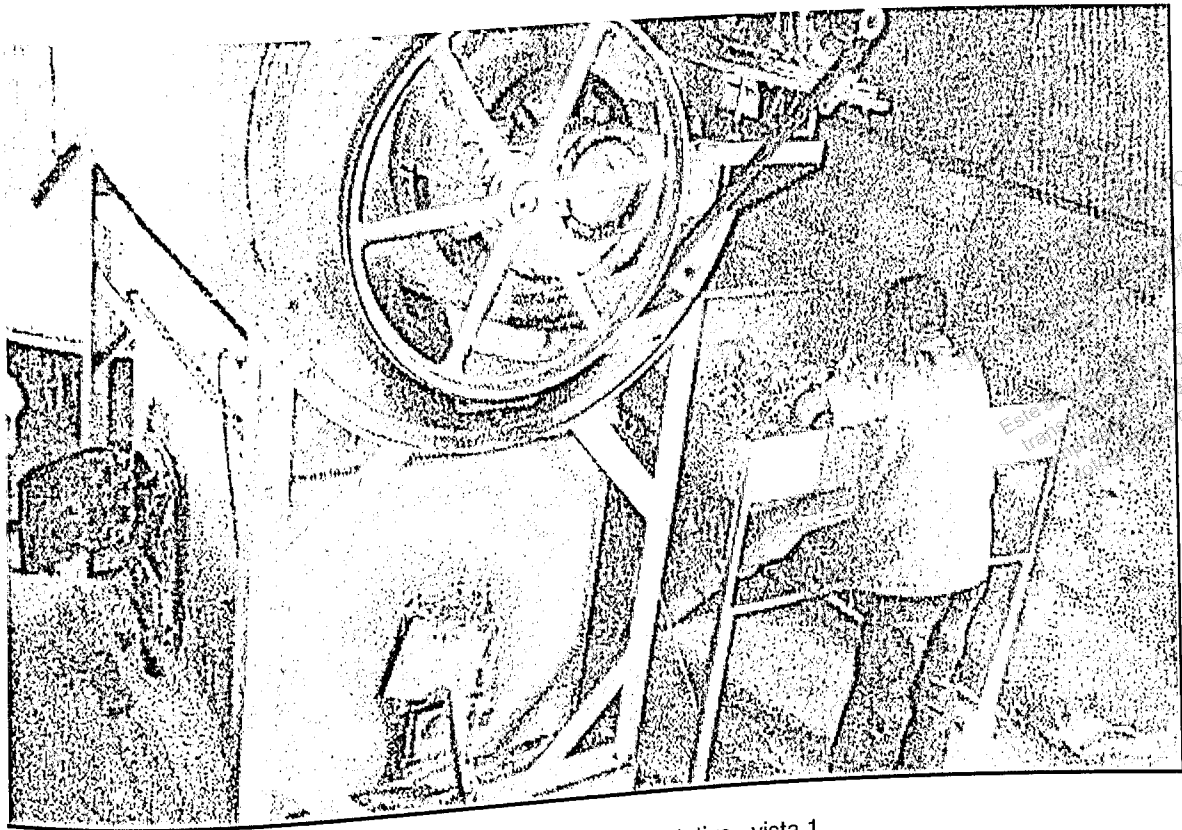


Figura 4.6 – Forno cilíndrico rotativo – vista 1

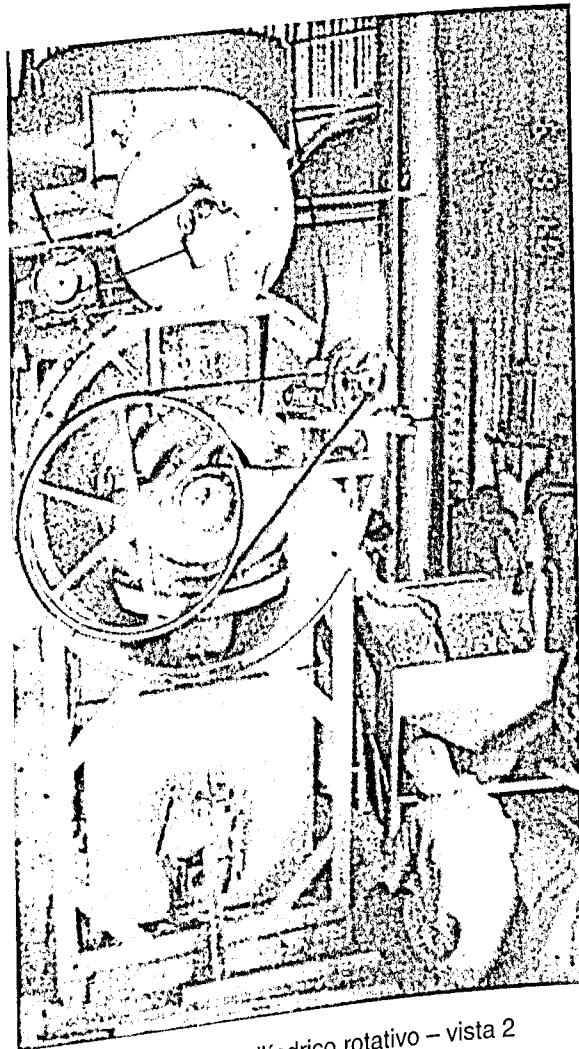


Figura 4.7 – Forno cilíndrico rotativo – vista 2

ORAL
os e protegidos
/1998.
a ser reproduzido ou
uais forem os meios
trônicos, mecânicos,
ou quaisquer outros.

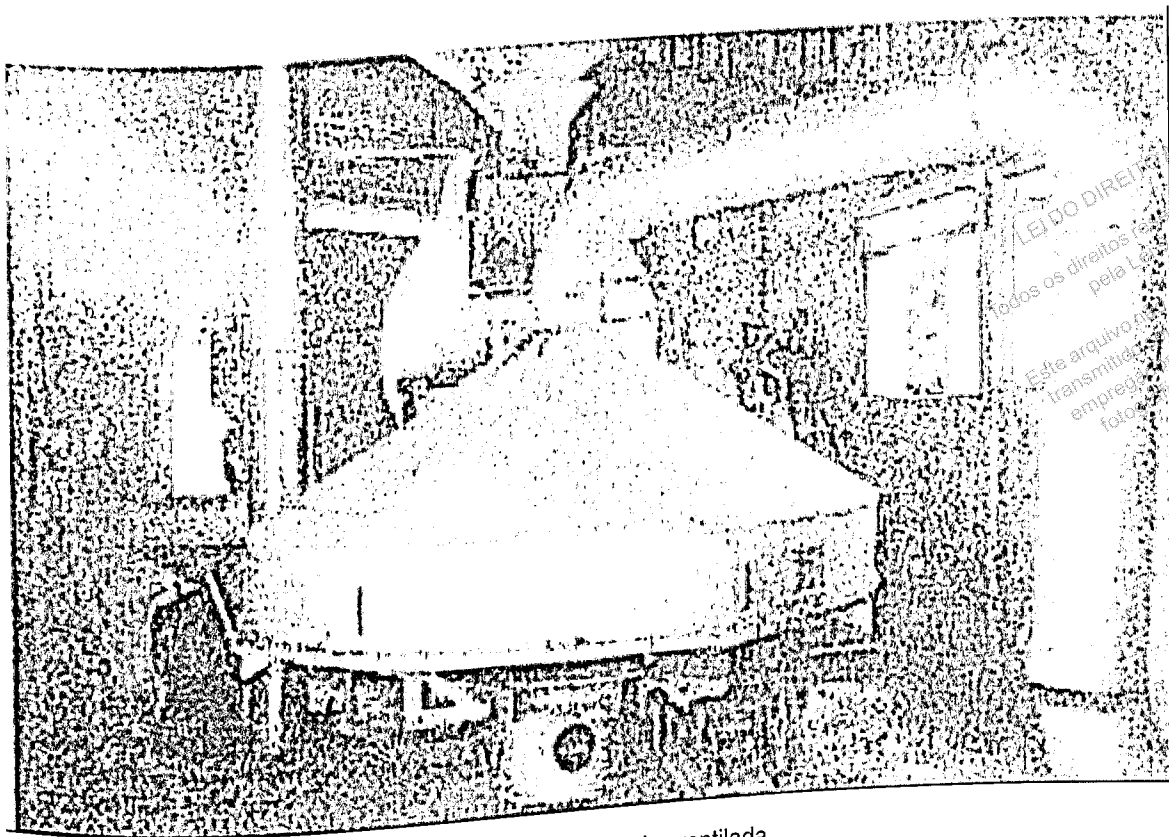


Figura 4.8 – Peneira ventilada

Os materiais foram pesados em uma balança mecânica de sacaria, tipo “plataforma”, com capacidade para 150 kg, seguindo-se a alimentação do forno em bateladas, de acordo com os seguintes tratamentos:

- Alimentação do forno à faixa de temperatura entre 160 - 180 °C, com o tempo de processo adotado de 15 minutos. Após esse período de tratamento térmico, o material foi descarregado em uma peneira ventilada e resfriado até atingir a temperatura ambiente.
- Alimentação do forno à faixa de temperatura entre 200 - 220 °C, com o tempo de processo adotado de 15 minutos. Após esse período de tratamento térmico, o material foi descarregado em uma peneira ventilada e resfriado até atingir a temperatura ambiente.
- Alimentação do forno à faixa de temperatura entre 220 - 240 °C, com o tempo de processo adotado de 15 minutos. Após esse período de tratamento térmico, o material foi descarregado em uma peneira ventilada e resfriado até atingir a temperatura ambiente.
- Alimentação do forno à faixa de temperatura entre 240 - 260 °C, com o tempo de processo adotado de 15 minutos. Após esse período de tratamento térmico, o material foi descarregado em uma peneira ventilada e resfriado até atingir a temperatura ambiente.

Após os tratamentos térmicos aplicados, os produtos obtidos (Figura 4.9) foram ensacados e pesados voltando a ficar estocados em galpão coberto, nas mesmas condições anteriores. Observou-se, no entanto, um aquecimento do material após o resfriamento na peneira e posterior ensacamento, tendo sido verificada inclusive a ocorrência de combustão espontânea em dois sacos. Para dissipação do calor, os cavacos foram novamente retirados dos sacos e espalhados sobre o piso cimentado, voltando a ser ensacados após 8 horas de repouso, quando o material já não apresentava alteração na temperatura.

Os materiais foram amostrados em conformidade com os procedimentos indicados na norma técnica NBR 10007 (ABNT, 1987) e encaminhados ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT²⁶, para determinação do poder calorífico superior e inferior além da determinação da umidade. A umidade foi determinada em conformidade com a norma técnica NBR 8112/86 - "carvão vegetal - análise imediata" com utilização de balança analítica²⁷ e mufla²⁸. O poder calorífico superior foi determinado através da norma ASTM D 240-02 - "Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter" e o poder calorífico inferior determinado através de cálculo de acordo com a análise do teor dos elementos através das normas ASTM D 5291-96 - "Standart Test Method for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, Nitrogen in Petroleum Products and Lubricants" e ASTM D 4239-00 "Standart Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High Temperature Tube Furnace Combustion Method". Foram utilizados equipamentos do tipo analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio²⁹, analisador de enxofre³⁰, balanças analíticas³¹, calorímetro adiabático³², bombas calorimétricas³³ e termoresistência³⁴.

²⁶ Inicialmente as amostras foram preparadas para análise pelo CETEC (quarteamento, moagem e peneiramento), para posterior encaminhamento ao IPT. Em função de uma avaria nos sensores do calorímetro adiabático do CETEC, não foi possível a realização das análises na Fundação, motivo da transferência das amostras para o IPT.

²⁷ Balança analítica código 35586 - certificado de calibração nº 56031. Validade da calibração: maio 2005

²⁸ Mufla código 14910 - relatório de medição nº 01038. Validade da calibração: julho 2006

²⁹ Código LCL 002, calibrado em 23/11/2004

³⁰ Código 33805, calibrado em 23/11/2004.

³¹ Balanças analíticas: código 33510 - Certificado de calibração nº 51348. Validade da calibração: outubro/2004, código LCL 003 - Certificado de calibração nº 52539. validade da calibração: novembro/2004 e código 35586 - Certificado de calibração nº 56031. Validade da calibração: maio/2005.

³² Código 21354

³³ Códigos 8040 e 8357. Validade da calibração: abril/2005

³⁴ Códigos 8040 e 8357. Validade da calibração: janeiro/2007

³⁴ Código 35586 - Certificado de calibração nº 54140. Validade da calibração: janeiro/2007

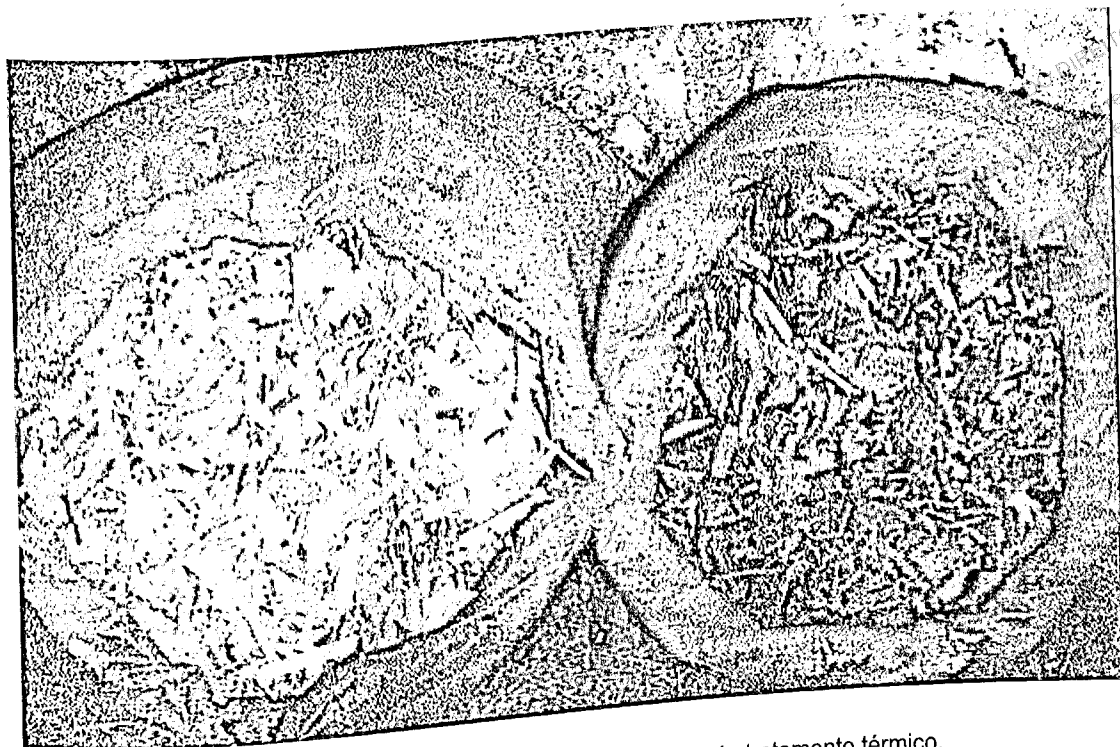


Figura 4.9 – Cavaco cru (a esquerda) e cavaco após tratamento térmico.

4.6 Teste de queima em fornalha - campanhas de amostragens isocinéticas

O teste de queima em fornalha ocorreu em escala real, em uma unidade de panificação³⁵ onde se encontravam instalados dois fornos a lenha. Escolheu-se o forno de maior porte, onde estavam sendo produzidos pães e diversos produtos de confeitaria, num turno normal de funcionamento das 2:00 horas às 16:00 horas. O forno operou a uma faixa de temperatura entre 180 °C e 200 °C nas seis câmaras onde ocorria o processo de produção do estabelecimento em regime normal. A fornalha possuía opção de alimentação automática para serragem de madeira através de transportador helicoidal ou alimentação manual com lenha em toras. O sistema de exaustão possuía a opção de tiragem natural ou ventilação forçada através de ventilador centrífugo, no caso da alimentação automática. O experimento ocorreu com a tiragem natural em todos os testes de queima realizados. O teste visava a avaliação do comportamento dos diversos combustíveis nas condições normais de operação do forno, o

³⁵ Padaria São Geraldo - Belo Horizonte/MG

qual durante todas as medições realizadas, encontrava-se em regime de produção plena. Para realização das campanhas de amostragem, foi instalado um duto com 1300 milímetros de comprimento por 300 milímetros de diâmetro. As metodologias adotadas nas coletas e análises, pela empresa de medições ambientais³⁶ nas campanhas de amostragem, observaram as seguintes normas:

- MB 3080 - Efluentes gasosos em dutos e chaminé de fontes estacionárias - Determinação da velocidade e vazão.
- MB 3081 - Efluentes gasosos em dutos e chaminé de fontes estacionárias - Determinação da umidade.
- MB 3355/90 - Efluentes gasosos em dutos e chaminé de fontes estacionárias - Determinação de material particulado.
- NBR 8969 - Poluição do ar.
- NBR 10020 - Efluentes gasosos em dutos e chaminé de fontes estacionárias - Calibração dos equipamentos de amostragem.
- NBR 10700 - Planejamento de amostragem em dutos e chaminé de fontes estacionárias.
- NBR 10701 - Determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminé de fontes estacionárias.
- NBR 10702 - Efluentes gasosos em dutos e chaminé de fontes estacionárias - Determinação da massa molecular – método de ensaio.
- NBR 12827 - Efluentes gasosos com sistema filtrante no interior do duto ou chaminé de fontes estacionárias - Determinação de Material Particulado.

Foram selecionados para os testes de queima três combustíveis para aplicação na fornalha, a saber:

UFMG - Biblioteca Universitária
Coleção Memória Intelectual

³⁶ Segma - Engenharia de Segurança do Trabalho e Meio Ambiente Ltda.

- Produto obtido no tratamento térmico por 15 minutos, à faixa de temperatura entre 160 e 180 °C, apresentando aspecto de "cavaco de madeira cru" (coloração original da madeira);

- Produto obtido no tratamento térmico por 15 minutos, à faixa de temperatura entre 220 e 240 °C, com aspecto de "cavaco de madeira torrado" (coloração amarronzada). O produto foi escolhido entre os três outros tratamentos aplicados, em função da maior uniformidade quanto ao aspecto visual, uma vez que o material apresentava o aspecto típico da torra (coloração amarronzada), com ausência de partículas carbonizadas (com aspecto de carvão vegetal) e ausência de partículas de madeira com coloração clara (aspecto de madeira que não sofreu tratamento térmico);

- Resíduos de madeira (lenha de podas) sem tratamento mecânico e sem tratamento térmico, com secagem natural.

As campanhas de amostragem foram realizadas no período entre 16 e 18 de agosto de 2004. Os parâmetros foram avaliados em três campanhas de amostragem em cada combustível aplicado, com duração de 60 minutos por campanha, em doze pontos por eixo durante 2,5 minutos em cada ponto, para obtenção das seguintes determinações no fluxo gasoso proveniente da fornalha: temperatura, umidade, velocidade, vazão e vazão normal, concentração de material particulado, taxa de emissão de material particulado e composição volumétrica dos gases.

5 RESULTADOS

Os resultados obtidos nas diversas etapas dos trabalhos experimentais encontram-se apresentados nas tabelas, acompanhados das médias aritméticas calculadas a partir das repetições dos ensaios e análises realizadas.

5.1 Ensaio em escala laboratorial

5.1.1 Determinação do poder calorífico superior e inferior em cadinho aberto – tratamento térmico em mufla

Os resultados individuais das amostras utilizadas para determinação do poder calorífico superior e inferior em cadinho aberto, teor de enxofre, teor de carbono e hidrogênio, encontram-se expressos nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3. Os valores de T correspondem às leituras das temperaturas iniciais e finais obtidas durante as análises no calorímetro adiabático, sendo F o fator da bomba, obtido por calibração, através da combustão do ácido benzóico.

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

Tabela 5.1 - Planilha para determinação do poder calorífico inferior e superior - tratamento térmico em mufla com cadinho aberto

| Amostra sem tratamento térmico | | | | | | | | | | |
|---|---------|--------|--------|--------|-----|------|------|--------|--------|--------|
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S% | H% | F | PCS | PCI |
| ST 01 | 0,99720 | 23,689 | 25,435 | 2,5 | 16 | 0,07 | 6,46 | 2438,3 | 4217,6 | 3890,0 |
| ST 02 | 0,98841 | 23,777 | 25,49 | 3,0 | 16 | 0,07 | 6,46 | 2438,3 | 4166,7 | 3839,2 |
| Média | | | | | | | | | 4192,2 | 3864,6 |
| Amostra com tratamento térmico - 140 °C | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S% | H% | F | PCS | PCI |
| 140-1 | 1,01600 | 23,628 | 25,632 | 1,5 | 17 | 0,08 | 6,37 | 2438,3 | 4771,2 | 4448,3 |
| 140-2 | 1,03877 | 23,16 | 25,23 | 1,5 | 18 | 0,08 | 6,37 | 2438,3 | 4820,6 | 4497,7 |
| Média | | | | | | | | | 4795,9 | 4473,0 |
| Amostra com tratamento térmico - 180 °C | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S% | H% | F | PCS | PCI |
| 180-1 | 1,03504 | 22,512 | 24,61 | 2,5 | 16 | 0,08 | 6,31 | 2438,3 | 4892,5 | 4572,5 |
| 180-2 | 1,01218 | 23,204 | 25,64 | 3,0 | 17 | 0,08 | 6,31 | 2438,3 | 4845,9 | 4525,8 |
| Média | | | | | | | | | 4869,2 | 4549,2 |
| Amostra com tratamento térmico - 220 °C | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S% | H% | F | PCS | PCI |
| 220-1 | 0,84446 | 22,8 | 24,7 | 3,0 | 15 | 0,09 | 5,32 | 2438,3 | 5417,8 | 5148,0 |
| 220-2 | 0,84456 | 22,92 | 24,82 | 2,5 | 17 | 0,09 | 5,32 | 2438,3 | 5423,0 | 5153,1 |
| Média | | | | | | | | | 5267,1 | 5150,5 |
| Amostra com tratamento térmico - 260 °C | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S% | H% | F | PCS | PCI |
| 260-1 | 0,95181 | 22,318 | 24,49 | 2,5 | 23 | 0,10 | 5,38 | 2438,3 | 5502,3 | 5229,6 |
| 260-2 | 0,95156 | 22,92 | 25,09 | 2,5 | 17 | 0,10 | 5,38 | 2438,3 | 5504,9 | 5232,2 |
| Média | | | | | | | | | 5356,0 | 5230,9 |
| Amostra com tratamento térmico - 300 °C | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S% | H% | F | PCS | PCI |
| 300-1 | 0,92842 | 22,948 | 25,19 | 3,0 | 23 | 0,10 | 4,83 | 2438,3 | 5817,3 | 5572,4 |
| 300-2 | 0,93158 | 22,98 | 25,24 | 2,5 | 23 | 0,10 | 4,83 | 2438,3 | 5852,1 | 5607,2 |
| Média | | | | | | | | | 5685,8 | 5589,8 |

Sendo o PCS dado por:

$$PCS = \frac{(TxF - e1 - e2 - e3)}{m}$$

(4.1)

Em que:

PCS = poder calorífico superior, em cal/g;

T = diferença entre as temperaturas;

F = constante da bomba;

e1 = mL de Na₂CO₃ 0,0725, molar;

e2 = percentual de enxofre x 14, em %;

e3 = calorias consumidas no fio de ignição;

m = massa da amostra, em g;

E o PCI por:

$$PCI = \frac{(1,8 \times PCS) - (91,23 \times H \%)}{1,8};$$

(4.3)

Em que:

PCI = poder calorífico inferior, em cal/g;

H % = percentual de hidrogênio, em %;

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

Tabela 5.2 - Planilha para determinação do teor de enxofre na amostra (S) - tratamento térmico em mufla com cadinho aberto

| Determinação do teor de enxofre - Método ANSI/ASTM D129-64 | | | | | |
|--|---------|----------|----------|-------|-----------|
| Amostra sem tratamento térmico | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | S (%) | Média (%) |
| ST 01 | 0,99720 | 15,79663 | 15,80169 | 0,070 | 0,07 |
| ST 02 | 0,98841 | 16,61699 | 16,62261 | 0,078 | |
| Amostra com tratamento térmico - 140 °C | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | S % | Média (%) |
| 140-1 | 1,01600 | 20,48810 | 20,49450 | 0,087 | 0,08 |
| 140-2 | 1,03877 | 21,27013 | 21,27630 | 0,082 | |
| Amostra com tratamento térmico - 180 °C | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | S % | Média (%) |
| 180-1 | 1,03504 | 20,48810 | 20,49390 | 0,077 | 0,08 |
| 180-2 | 1,01218 | 22,27013 | 22,27600 | 0,080 | |
| Amostra com tratamento térmico - 220 °C | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | S % | Média (%) |
| 220-1 | 1,02313 | 20,48810 | 20,51760 | 0,396 | 0,35 |
| 220-2 | 0,98463 | 21,27013 | 21,29242 | 0,311 | |
| Amostra com tratamento térmico - 260 °C | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | S % | Média (%) |
| 260-1 | 1,02313 | 20,48810 | 20,51760 | 0,396 | 0,35 |
| 260-2 | 0,98463 | 21,27013 | 21,29242 | 0,311 | |
| Amostra com tratamento térmico - 300 °C | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | S % | Média (%) |
| 300-1 | 1,02313 | 20,48810 | 20,51760 | 0,396 | 0,35 |
| 300-2 | 0,98463 | 21,27013 | 21,29242 | 0,311 | |

Sendo o teor de enxofre da amostra dado por:

(4.2)

$$S\% = \frac{(M3 - M2) \times 13,734}{m}$$

Em que:

S % = percentual de enxofre na amostra, em %

m = massa da amostra, em g;

M2 = massa do cadinho tarado, em g;

M3 = massa do cadinho com amostra, em g.

Tabela 5.3 - Planilha para Determinação do teor de carbono, nitrogênio e hidrogênio - Método Aparelho C.H.N. - tratamento em mufla com cadinho aberto

| Amostra sem tratamento térmico | | | | | |
|---|---------|---------|---------|-------|---------------|
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 45,85 | 45,89 | 45,62 | 45,43 | C = 45,43 |
| Hidrogênio | 6,52 | 6,53 | 6,47 | 6,46 | H = 6,46 |
| Nitrogênio | 0,45 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | N = 0,46 |
| Amostra com tratamento térmico - 140 °C | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 49,90 | 49,90 | 48,89 | 49,50 | C = 49,50 |
| Hidrogênio | 6,52 | 6,52 | 6,20 | 6,37 | H = 6,37 |
| Nitrogênio | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | N = 0,50 |
| Amostra com tratamento térmico - 180 °C | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 47,31 | 50,30 | 47,31 | 47,93 | C = 47,93 |
| Hidrogênio | 6,13 | 6,47 | 6,47 | 6,31 | H = 6,31 |
| Nitrogênio | 0,67 | 0,49 | 0,49 | 0,55 | N = 0,55 |
| Amostra com tratamento térmico - 220 °C | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 58,50 | 58,02 | 58,96 | 58,03 | C = 58,03 |
| Hidrogênio | 5,43 | 5,23 | 5,42 | 5,32 | H = 5,32 |
| Nitrogênio | 0,45 | 0,47 | 0,47 | 0,46 | N = 0,46 |
| Amostra com tratamento térmico - 260 °C | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 58,50 | 59,41 | 59,41 | 58,64 | C = 58,64 |
| Hidrogênio | 5,43 | 5,40 | 5,42 | 5,38 | H = 5,38 |
| Nitrogênio | 0,45 | 0,45 | 0,46 | 0,45 | N = 0,45 |
| Amostra com tratamento térmico - 300 °C | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 64,01 | 64,23 | 64,52 | 63,87 | C = 63,87 |
| Hidrogênio | 4,85 | 4,78 | 4,96 | 4,83 | H = 4,83 |
| Nitrogênio | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | N = 0,45 |

5.1.2 Determinação do poder calorífico superior e inferior em cadinho fechado com tampa – tratamento térmico em mufla

Tabela 5.4 - Planilha de determinação do PCI e PCS - tratamento térmico em mufla com cadinho fechado

| Amostra sem tratamento térmico | | | | | | | | | | |
|--|---------|--------|--------|--------|-----|------|------|--------|--------|--------|
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S % | H % | F | PCS | PCI |
| ST 01 | 0,99950 | 25,076 | 26,809 | 0,1 | 10 | 0,07 | 6,45 | 2438,3 | 4215,3 | 3888,6 |
| ST 02 | 1,00338 | 25,2 | 26,946 | 0,1 | 10 | 0,07 | 6,45 | 2438,3 | 4230,6 | 3903,9 |
| Média | | | | | | | | | | |
| Amostra com Tratamento Térmico em Estufa | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S % | H % | F | PCS | PCI |
| ST 01 | 1,00803 | 22,133 | 24,003 | 3,0 | 12 | 0,08 | 6,43 | 2438,3 | 4469,2 | 4143,5 |
| ST 02 | 0,99930 | 23,471 | 25,336 | 3,0 | 12 | 0,08 | 6,43 | 2438,3 | 4496,1 | 4170,3 |
| Média | | | | | | | | | | |
| Amostra com tratamento térmico - 200 °C | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S % | H % | F | PCS | PCI |
| 200-1 | 1,06401 | 18,73 | 20,889 | 0,1 | 19 | 0,08 | 6,17 | 2438,3 | 4927,4 | 4614,8 |
| 200-2 | 1,08618 | 20,329 | 22,489 | 0,1 | 19 | 0,08 | 6,17 | 2438,3 | 4829,1 | 4516,5 |
| Média | | | | | | | | | | |
| Amostra com tratamento térmico - 210 °C | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S % | H % | F | PCS | PCI |
| 210-1 | 1,10616 | 21,904 | 24,135 | 0,1 | 8 | 0,08 | 6,30 | 2438,3 | 4908,3 | 4589,1 |
| 210-2 | 1,08187 | 22,447 | 24,61 | 0,1 | 8 | 0,08 | 6,30 | 2438,3 | 4865,2 | 4546,0 |
| Média | | | | | | | | | | |
| Amostra com tratamento térmico - 220 °C | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S % | H % | F | PCS | PCI |
| 220-1 | 1,0824 | 21,407 | 23,546 | 0,1 | 10 | 0,08 | 6,34 | 2438,3 | 4816,5 | 4495,1 |
| 220-2 | 1,13229 | 23,403 | 25,716 | 0,1 | 10 | 0,08 | 6,34 | 2438,3 | 4969,8 | 4648,4 |
| Média | | | | | | | | | | |
| Amostra com tratamento térmico - 230 °C | | | | | | | | | | |
| Amostra | Massa | T1 | T2 | Volume | Fio | S % | H % | F | PCS | PCI |
| 230-1 | 1,08890 | 24,415 | 26,6 | 0,1 | 10 | 0,08 | 6,34 | 2438,3 | 4881,2 | 4559,8 |
| 230-2 | 1,09428 | 23,632 | 25,84 | 0,1 | 10 | 0,08 | 6,34 | 2438,3 | 4908,5 | 4587,1 |
| Média | | | | | | | | | | |

Sendo o PCS dado por:

$$PCS = \frac{(T \times F - e1 - e2 - e3)}{m}$$

Em que:

PCS = poder calorífico superior, em cal/g;

T = diferença entre as temperaturas;

F = fator da bomba;

e1 = volume de Na_2CO_3 0,0725 molar;

e2 = percentual de enxofre x 14, em %;

e3 = calorias consumidas no fio de ignição, em cal;

m = massa da amostra, em g;

E o PCI por:

$$PCI = \frac{[(1,8 \times PCS) - (91,23 \times H \%)]}{1,8}$$

(4.3)

Em que:

PCI = poder calorífico inferior, em cal/g;

H% = percentual de hidrogênio, em %.

(4.1)

LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

Tabela 5.5 - Planilha para determinação do teor de enxofre na amostra - tratamento térmico em mufla com cadinho fechado

| Determinação do teor de enxofre - Método ANSI/ASTM D129-64 | | | | | |
|--|---------|----------|----------|-------|-----------|
| Amostra sem tratamento térmico | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | % | Média (%) |
| ST 01 | 0,99720 | 15,79663 | 15,80179 | 0,071 | 0,08 |
| ST 02 | 0,98841 | 16,61699 | 16,62271 | 0,079 | |
| Amostra com tratamento térmico - estufa | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | % | Média (%) |
| ST 01 | 0,29240 | 20,48810 | 20,48990 | 0,085 | 0,08 |
| ST 02 | 0,29220 | 21,27013 | 21,27166 | 0,072 | |
| Amostra com tratamento térmico - 200 °C | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | % | Média (%) |
| 200-1 | 1,02494 | 20,58810 | 20,59390 | 0,078 | 0,08 |
| 200-2 | 1,05218 | 22,38013 | 22,39600 | 0,077 | |
| Amostra com tratamento térmico - 210 °C | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | % | Média (%) |
| 210-1 | 1,03504 | 20,48810 | 20,49390 | 0,077 | 0,08 |
| 210-2 | 1,01218 | 22,27013 | 22,27600 | 0,080 | |
| Amostra com tratamento térmico - 220 °C | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | % | Média (%) |
| 220-1 | 1,04505 | 20,48910 | 20,49390 | 0,063 | 0,08 |
| 220-2 | 1,09218 | 22,29013 | 22,29826 | 0,102 | |
| Amostra com tratamento térmico - 230 °C | | | | | |
| Amostra | Massa 1 | Massa 2 | Massa 3 | % | Média (%) |
| 230-1 | 1,08005 | 23,48910 | 23,49620 | 0,090 | 0,09 |
| 230-2 | 0,99952 | 24,29630 | 24,29630 | 0,085 | |

Sendo que:

(4.2)

$$S\% = \frac{[(M3 - M2) \times 13,734]}{m};$$

Em que:

S% = percentual de enxofre na amostra, em %;

m = massa da amostra, em g, na análise do PCS;

M2 = massa do cadinho tarado, em g;

M3 = massa do cadinho com amostra, em g.

Tabela 5.6 - Planilha para Determinação do teor de carbono, nitrogênio e hidrogênio - Método Aparelho C.H.N. - tratamento térmico em mufla cadinho fechado

| Amostra sem tratamento térmico | | | | | |
|---|---------|---------|---------|----------|---------------|
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | Teor (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 46,44 | 46,45 | 46,44 | 46,02 | C = 46,02 |
| Hidrogênio | 6,53 | 6,53 | 6,54 | 6,45 | H = 6,45 |
| Nitrogênio | 1,02 | 1,03 | 1,02 | 1,00 | N = 1,00 |
| Amostra com tratamento térmico - Estufa | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | Teor (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 46,85 | 46,62 | 46,75 | 46,32 | C = 46,32 |
| Hidrogênio | 6,52 | 6,40 | 6,42 | 6,43 | H = 6,43 |
| Nitrogênio | 1,08 | 1,05 | 1,05 | 1,03 | N = 1,03 |
| Amostra com tratamento térmico - 200 °C | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | Teor (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 47,88 | 47,89 | 47,90 | 47,79 | C = 47,79 |
| Hidrogênio | 6,22 | 6,30 | 6,23 | 6,17 | H = 6,17 |
| Nitrogênio | 1,08 | 1,09 | 1,09 | 1,06 | N = 1,06 |
| Amostra com tratamento térmico - 210 °C | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | Teor (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 48,79 | 48,38 | 48,78 | 48,21 | C = 48,21 |
| Hidrogênio | 6,32 | 6,33 | 6,30 | 6,30 | H = 6,30 |
| Nitrogênio | 1,21 | 1,28 | 1,21 | 1,20 | N = 1,20 |
| Amostra com tratamento térmico - 220 °C | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | Teor (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 48,89 | 48,89 | 48,88 | 48,44 | C = 48,44 |
| Hidrogênio | 6,42 | 6,43 | 6,43 | 6,34 | H = 6,34 |
| Nitrogênio | 1,28 | 1,28 | 1,30 | 1,25 | N = 1,25 |
| Amostra com tratamento térmico - 230 °C | | | | | |
| | Valor 1 | Valor 2 | Valor 3 | Teor (%) | Resultado (%) |
| Carbono | 50,00 | 49,62 | 49,85 | 49,71 | 49,71 |
| Hidrogênio | 6,36 | 6,47 | 6,52 | 6,38 | 6,38 |
| Nitrogênio | 0,25 | 0,32 | 0,30 | 0,29 | 0,29 |

Tabela 5.7 – Perda de massa nos tratamentos térmicos em laboratório a diversas temperaturas com cadinho sem tampa

| Temperatura do tratamento | Perda de massa (%)* |
|---------------------------|---------------------|
| Estufa 105 °C | 13 |
| 140 °C | 13,38 |
| 180 °C | 14,88 |
| 220 °C | 48,92 |
| 260 °C | 51,12 |
| 300 °C | 74,78 |

* Em relação à amostra úmida

Tabela 5.8 – Perda de massa nos tratamentos térmicos em laboratório a diversas temperaturas com cadinho fechado (com tampa) e ganho de umidade após 24, 48 e 72 horas

| Temperatura do tratamento | Perda de massa (%)** | Ganho de Umidade ** | | |
|---------------------------|----------------------|---------------------|------|------|
| | | 24 h | 48 h | 72 h |
| Estufa 105 °C | 5,7 | - | - | - |
| 200 °C | 0,6 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 210 °C | 1,5 | 0,9 | 1,0 | 1,0 |
| 220 °C | 1,6 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 230 °C | 1,7 | 0,9 | 0,9 | 1,0 |

** Em relação à amostra seca em estufa

5.2 Ensaios em escala real

Tabela 5.9 - Percentual de umidade, enxofre, hidrogênio em cavacos de madeira submetidos a tratamento térmico em forno rotativo em diversas faixas de temperatura

| Umidade (%) | | |
|---------------------------------|-----------------|-----------|
| Tratamento térmico 160 a 180 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 8,4 | 8,3 | 8,3 ± 0,7 |
| Tratamento térmico 200 a 220 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 6,0 | 5,7 | 5,9 ± 0,6 |
| Tratamento térmico 220 a 240 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 4,9 | 4,9 | 4,9 ± 0,6 |
| Tratamento térmico 240 a 260 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 6,9 | 6,9 | 6,9 ± 0,6 |
| Enxofre total (%) | | |
| Tratamento térmico 160 a 180 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 0,015 | 0,015 | <0,1 |
| Tratamento térmico 200 a 220 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 0,013 | 0,011 | <0,1 |
| Tratamento térmico 220 a 240 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 0,012 | 0,012 | <0,1 |
| Tratamento térmico 240 a 260 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 0,011 | 0,014 | <0,1 |
| Hidrogênio (%) | | |
| Tratamento térmico 160 a 180 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 6,0 | 6,2 | 6,1 |
| Tratamento térmico 200 a 220 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 6,0 | 6,0 | 6,0 |
| Tratamento térmico 220 a 240 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 6,1 | 5,9 | 6,0 |
| Tratamento térmico 240 a 260 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 6,0 | 6,0 | 6,0 |

Tabela 5.10 - Poder calorífico superior e inferior em cavacos de madeira submetidos a tratamento térmico em forno rotativo em diversas faixas de temperatura

| Poder Calorífico Superior (kcal/kg) | | |
|-------------------------------------|-----------------|-------|
| Tratamento térmico 160 a 180 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 4665 | 4641 | 4653 |
| Tratamento térmico 200 a 220 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 4760 | 4832 | 4796 |
| Tratamento térmico 220 a 240 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 4785 | 4785 | 4785 |
| Tratamento térmico 240 a 260 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 4808 | 4736 | 4772 |
| Poder Calorífico Inferior (kcal/kg) | | |
| Tratamento térmico 160 a 180 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 4354 | 4306 | 4330 |
| Tratamento térmico 200 a 220 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 4449 | 4521 | 4485 |
| Tratamento térmico 220 a 240 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 4473 | 4473 | 4473 |
| Tratamento térmico 240 a 260 °C | | |
| 1ª Determinação | 2ª determinação | Média |
| 4497 | 4425 | 4461 |

LEI DO DIREITO AUTORAL
 Todos os direitos reservados e protegidos
 pela Lei 9.610/1998.
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou
 transmitido sem que sejam os meios
 empregados: eletrônicos, mecânicos,
 fotográficos ou quaisquer outros.

5.3 Campanhas de amostragem isocinética

Tabela 5.11 - Resultados obtidos em amostragem isocinética nos gases de exaustão na chaminé de uma fornalha queimando lenha

| Parâmetros | Unidade | ATF 1780407 | ATF 1780408 | ATF 1780409 |
|---|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| Temperatura | °C | 250,50 | 201,17 | 273,46 |
| Umidade | %Vol. | 2,88 | 3,64 | 5,30 |
| Velocidade | m/min | 192,6937 | 178,8552 | 198,7706 |
| Vazão | m ³ /h | 817,2429 | 758,5517 | 843,0161 |
| Vazão | Nm ³ /h | 373,8275 | 380,0866 | 360,1997 |
| Concentração de Material Particulado | mg/Nm ³ | 134,6843 | 154,1283 | 321,2872 |
| Taxa de emissão de Material Particulado | kg/h | 0,0503 | 0,0586 | 0,1157 |
| Isocinética | % | 94,40 | 94,70 | 95,48 |

Tabela 5.12 - Resultados obtidos em amostragem isocinética nos gases de exaustão na chaminé de uma fornalha queimando cavaco tratado a 160 – 180° C

| Parâmetros | Unidade | ATF 1780404 | ATF 1780405 | ATF 1780406 |
|---|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| Temperatura | °C | 210,00 | 212,63 | 215,21 |
| Umidade | %Vol. | 3,21 | 4,01 | 4,27 |
| Velocidade | m/min | 179,3166 | 186,7700 | 186,5236 |
| Vazão | m ³ /h | 760,5086 | 792,1197 | 791,0744 |
| Vazão | Nm ³ /h | 375,3281 | 385,6246 | 382,0187 |
| Concentração de Material Particulado | mg/Nm ³ | 85,3965 | 95,4928 | 153,4581 |
| Taxa de emissão de Material Particulado | kg/h | 0,0321 | 0,0368 | 0,0586 |
| Isocinética | % | 94,77 | 95,09 | 95,29 |

Tabela 5.13 - Resultados obtidos em amostragem isocinética nos gases de exaustão na chaminé de uma fornalha queimando cavaco torrado

| Parâmetros | Unidade | ATF 1780401 | ATF 1780402 | ATF 1780403 |
|---|---------|-------------|-------------|-------------|
| Temperatura | °C | 269,17 | 246,50 | 262,38 |
| Umidade | %Vol. | 4,62 | 4,43 | 5,23 |
| Velocidade | m/min | 195,3532 | 190,2951 | 194,3608 |
| Vazão | m³/h | 828,5221 | 807,0701 | 824,3133 |
| Vazão | Nm³/h | 360,5581 | 367,2716 | 360,9433 |
| Concentração de Material Particulado | mg/Nm³ | 161,5965 | 122,9628 | 127,0195 |
| Taxa de emissão de Material Particulado | kg/h | 0,0583 | 0,0452 | 0,0458 |
| Isocinética | % | 96,48 | 96,37 | 96,62 |

Tabela 5.14 - Composição volumétrica dos gases - Medições realizadas durante as amostragens isocinéticas com ORSAT

| Gases | Combustível Aplicado | | |
|------------------------|----------------------|------------|--------|
| | Cavaco torrado | Cavaco Cru | Lenha |
| CO ₂ (%vol) | 4,600 | 2,300 | 1,400 |
| O ₂ (%vol) | 16,200 | 18,400 | 19,400 |
| CO (%vol) | 0,047 | 0,048 | 0,030 |
| N ₂ (%vol) | 79,153 | 79,252 | 79,170 |

Tabela 5.15 - Planilha para determinação do consumo de combustível em fornalha durante teste de queima para avaliação de combustíveis diversos

| Combustível | Ínicio aquecimento (h) | Ínicio teste (h) | Final teste (h) | Peso total (kg) | Peso sobra (kg) | Consumo total (kg) | Consumo por hora (kg/h) | Tempo (min) | Alimentação |
|-----------------|------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| Carvaco torrado | 12:10 | 14:41 | 18:37 | 112,225 | 2,220 | 110,005 | 28,56 | 231 | Automática |
| Cavaco cru | 8:30 | 9:51 | 14:19 | 95,090 | 26,850 | 68,240 | 15,28 | 268 | Automática |
| Lenha | 8:50 | 9:44 | 14:16 | 76,860 | 2,850 | 74,010 | 16,33 | 272 | Manual |

Tabela 5.16 – Planilha para determinação de perda de massa nos diversos tratamentos em forno rotativo e rendimento energético*

| Tratamento térmico (°C) | Pesagem inicial (kg) | Pesagem final (kg) | Perda de massa (%) | Rendimento energético (%) |
|-------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 160 - 180 °C | 111,32 | 99,63 | 10,50 | 96,88 |
| 200 - 220 °C | 108,60 | 89,60 | 17,49 | 92,50 |
| 220 - 240 °C | 132,48 | 107,50 | 18,85 | 90,74 |
| 240 - 260 °C | 96,40 | 75,64 | 21,53 | 87,51 |

*Rendimento do processo considerando o PCI de kcal/kg, adotado em conformidade com a Tabela 3.6 para uma faixa de umidade estimada para a lenha entre 10 e 15%.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou
 empurrado sem a permissão da UFPA
 todos os direitos reservados e protegidos
 pela Lei 9.610/1998.
 proibidos: eletrônicos, mecânicos,
 fotográficos ou quaisquer outros.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os experimentos realizados ocorreram visando a obtenção de dados para a análise da viabilidade técnica e ambiental do aproveitamento dos resíduos reciclados na obtenção de um combustível sólido adequado aos requisitos do mercado. Em uma primeira etapa os resíduos foram submetidos a tratamentos em escala de laboratório, analisando-se parâmetros inerentes à avaliação de um combustível tais como o poder calorífico inferior e superior, a umidade, a higroscopicidade, bem como a perda de massa experimentada pelo material após cada tratamento aplicado. Numa segunda etapa ainda no laboratório, foi identificada e testada a faixa de temperatura mais promissora para ser aplicada no processo em escala industrial, na etapa seguinte dos experimentos. Cabe ressaltar que em todos os tratamentos térmicos aplicados nas diversas etapas dos experimentos foi fixado um tempo de 15 minutos como o período em que os materiais eram submetidos às diversas temperaturas indicadas. Esse tempo foi adotado em função da observação de diversos processos industriais que adotam o processamento térmico no mesmo tipo de equipamento utilizado em escala real, ou seja, forno cilíndrico rotativo. Empreendimentos que operam nos segmentos de torrefação de café, torrefação de amendoim, dentre outros consultados, indicam que o ciclo de processamento completo do produto, incluindo alimentação, tratamento térmico e resfriamento não deverá ultrapassar 30 minutos, por razões econômicas e de rendimento de processo. A partir desse ponto a energia consumida no processo, aumentaria os custos do processamento, podendo inclusive inviabilizá-lo.

Os equipamentos envolvidos em escala real, no fluxograma de produção proposto para obtenção do combustível alternativo, foram escolhidos de acordo com a disponibilidade do mercado. Buscou-se um projeto no qual a montagem da planta industrial pudesse usufruir da facilidade de se encontrar fabricantes de equipamentos instalados no país, sem a necessidade da elaboração de projetos especiais de componentes mecânicos, nem de desenvolvimento de tecnologias específicas, o que conseqüentemente elevaria significativamente o custo de implantação de uma unidade industrial destinada ao processamento dos resíduos de madeira abordados no presente estudo.

As implicações ambientais decorrentes da utilização do combustível sólido desenvolvido foram abordadas como um dos pontos restritivos para a utilização do produto. As exigências da legislação ambiental vigente impõem limites para emissão de poluentes na atmosfera, as quais poderiam inviabilizar a aplicação do combustível. Um aspecto particular no entanto, deverá ser sempre abordado. Em algumas bibliografias pesquisadas, foram encontradas

diversas referências a produtos obtidos com a torrefação da madeira, como materiais a serem utilizados em pequenas fontes de geração de energia térmica ou até mesmo para consumo doméstico. Essas referências conduzem o produto a um mercado de pequenos estabelecimentos comerciais, indústrias de panificação, hotéis, hospitais, lavanderias industriais, dentre outros negócios que demandam energia térmica em seus processos produtivos. Muitas dessas empresas encontram-se instaladas em áreas densamente povoadas e até mesmo em grandes centros urbanos, onde a circunvizinhança se constitui de um impeditivo ao lançamento de emissões atmosféricas fora dos padrões estabelecidos pela legislação. Diante dessa constatação, o desenvolvimento de um combustível que possa aliar boa performance na combustão, custo competitivo e baixos níveis de emissão de poluentes, tornou-se uma barreira a ser transposta para disponibilizar uma opção energética no mercado de energia térmica.

6.1 Potencial para aplicação do produto e adaptação de fornalhas

O produto desenvolvido após aplicação do tratamento indicado proporciona ao material características adequadas aos requisitos comumente estabelecidos a uma boa combustão tais como:

- poder calorífico satisfatório para processos com necessidade de geração de energia térmica;
- baixa umidade e baixa higroscopicidade;
- uniformidade dimensional, possibilitando a automação dos mecanismos de alimentação de combustível;
- baixa taxa de geração de materiais particulados no fluxo gasoso proveniente da combustão.

A estocagem do material pode ser considerado outro ponto favorável ao manuseio do produto obtido, uma vez que em função do baixo teor de umidade, a ação de agentes biológicos que atuam na decomposição da madeira "in natura" é praticamente eliminada. Outro fator favorável pode ser atribuído: a possibilidade de acondicionamento do produto em sacos, "big-bags" ou mesmo para fornecimento a granel com a estocagem do produto sendo realizada em silos.

A aceitação dos cavacos de madeira processados termicamente pelo mercado, pode ser facilitada por uma série de dificuldades relacionadas ao uso da madeira "in natura" para combustão. Diversos fatores impeditivos para utilização da lenha em fornalhas podem ser relacionados tais como:

- necessidade de espaço suficiente no estabelecimento, para estocagem e manuseio do produto;
- pagamento do combustível por volume, geralmente em metros cúbicos, sendo que as cargas são entregues com alto índice de vazios nas carrocerias dos veículos, onde são realizadas as medições;
- dificuldade de fornecimento de material de boa qualidade para combustão em períodos chuvosos;
- grande variedade da composição e da umidade do material.

Deve-se ressaltar também a eliminação de problemas comumente associados à estocagem da lenha, tais como a eventual ocorrência de animais peçonhentos nas pilhas, o que comumente proporciona condições propícias para acidentes envolvendo esses animais e os trabalhadores que manuseiam o produto.

Um fator relevante pode ser levado ainda em consideração, relacionado aos processos mais exigentes quanto a uniformidade de fornecimento de energia térmica, podendo afetar em alguns casos, o controle do processo e a qualidade dos produtos fabricados. Ao se alimentar uma fornalha com lenha úmida, ocorre no período imediatamente após o abastecimento, uma diminuição da taxa de liberação de calor, em função da energia consumida na evaporação da água contida na madeira. Essa diminuição no fornecimento de energia impõe que o nível de consumo esteja sempre abaixo do menor valor da taxa de liberação de energia, que é atingido durante a evaporação da umidade da lenha introduzida na fornalha. Dessa forma, com o aumento na liberação de energia ocorre um desperdício, que se torna maior à medida em que aumenta a umidade da lenha que está sendo fornecida. A Figura 6.1 mostra o mecanismo de uma forma esquemática, de uma caldeira sendo alimentada com lenha para produção de vapor:

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sem que sejam os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

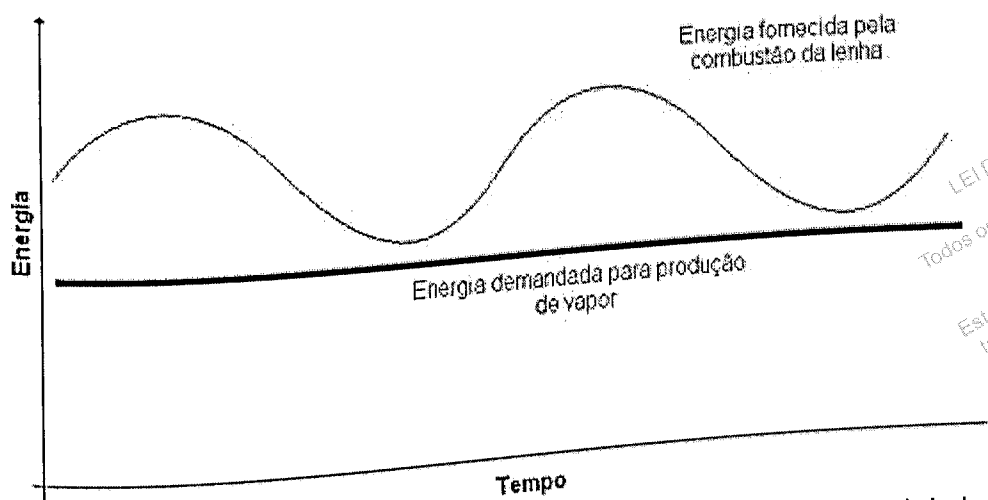


Figura 6.1 - Comparação qualitativa entre a taxa de energia fornecida pela combustão da lenha e a demandada para produção de vapor.

LEI DO DIREITO AUTORAL
 Todos os direitos reservados e protegidos
 pela Lei 9.610/1998.
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou
 transmitido sejam quais forem os meios
 empregados: eletrônicos, mecânicos,
 fotográficos ou quaisquer outros.

Com o processamento mecânico e térmico da lenha, obtém-se um produto com maior poder calorífico e umidade inferior a 5%, o que significa uma retomada mais rápida na liberação da energia. Sendo assim, a curva formada na figura 5.1, pela liberação de energia térmica x tempo, utilizando-se os cavacos de madeira processados termicamente, deverá possuir uma menor área de desperdício, ou seja, deverá apresentar uma nova área entre a curva de liberação e a de consumo de energia. A automação do processo de alimentação, possibilitada pela redução das peças a cavacos de madeira pelo tratamento mecânico, constitui outro fator importante relacionado ao desperdício. Em fornalhas com alimentação manual, normalmente os operadores, é que determinam o momento de se carregar a fornalha. A decisão é tomada através da prática adquirida, bem como pelo conhecimento dos horários de maior consumo pelo processo produtivo. Na maioria dos casos, a temperatura dos fornos ou a pressão de vapor nas caldeiras são os parâmetros observados para indicação de que o operador precisa alimentar a fornalha com mais combustível, com a quantidade fornecida sendo avaliada empiricamente. O desperdício de lenha, portanto, encontra-se associado ao fator de segurança que cada operador de fornalha impõe, entre a energia desenvolvida pelo combustível e a energia consumida pelo processo. Com a automação do processo, a alimentação mecânica poderá ser acionada, sempre que a energia gerada se mostrar em um patamar inferior ao desejado, sem interferência do operador, reduzindo o empirismo e o fator de segurança adotado. Conseqüentemente, a faixa de desperdício estará sendo reduzida.

Apesar das vantagens verificadas, a utilização dos cavacos de madeira nas fornalhas, deverá passar por uma adaptação nos equipamentos existentes, para substituição do combustível. O exemplo avaliado por DINIZ (1981), para substituição do combustível utilizado em uma

caldeira a óleo, com capacidade nominal de produção de vapor de 4.000 kg/h, poderá ser aplicado, levando em consideração a substituição do óleo por cavacos de madeira termicamente processados.

Os dados a serem adotados para aplicação do combustível em uma fornalha adaptada seriam:

- Poder calorífico superior (PCS) = 4.785 kcal/kg³⁷
- Poder calorífico inferior (PCI) = 4.521 kcal/kg³⁸
- Rendimento térmico (RT) = 76,3%³⁹

Para que se processe a queima de cavacos processados termicamente na fornalha, deve-se aplicar a equação (3.8):

$$WF = \frac{H_0}{\frac{R_T}{100} \times PCS}$$

$$WF = \frac{2.408.000 \text{ kcal/h}}{\frac{76,3}{100} \times 4785 \text{ kcal/kg}} = 659,55 \text{ kg/h}$$

Aplicando-se o consumo de combustível (WF) de 659,55 kg/h e o limite de 300.000 kcal/m³.h para a taxa de liberação de calor na fornalha na equação (3.11) para se obter o volume da fornalha, tem-se:

$$V = \frac{659,55 \text{ kg/h} \times 4785}{300.000}$$

$$V = 10,52 \text{ m}^3$$

³⁷ Valores obtidos nas análises dos resíduos após o tratamento mecânico e térmico.

³⁸ Valores obtidos nas análises dos resíduos após o tratamento mecânico e térmico.

³⁹ Valor obtido na tabela 3.5, considerando 10 % de umidade e temperatura dos gases da chaminé de 275° C

DIREITO AUTENTAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

O volume necessário para a fornalha é oito vezes maior que o volume necessário para combustão do óleo (1,31 m³) e praticamente possui o mesmo volume da fornalha para queima de lenha em toras (11,68 m³), que necessita um volume nove vezes maior.

6.2 *Análise comparativa entre os resultados obtidos nos experimentos em escala laboratorial, escala industrial e na literatura consultada*

No tratamento mecânico aplicado aos resíduos, para que fossem evitados danos ao equipamento (picador de toras), uma etapa preliminar de inspeção dos materiais teve de ser adotada. Por se tratarem de resíduos urbanos, a presença de pregos, arames, fios, entre outros elementos estranhos aos materiais lenhosos foi eventualmente constatada. A inspeção e separação das partes com essas interferências, com utilização de moto-serra, foi determinante para verificação de uma queda na produção do equipamento, assim como a desuniformidade dimensional verificada nessas peças. As peças maiores foram divididas antes do encaminhamento ao processamento mecânico.

Em toda a bibliografia consultada, foram encontradas indicações de que a redução do tamanho das partículas iria proporcionar uma maior eficiência na remoção da umidade e na cinética das reações ligadas ao processo de torrefação (JIRJIS, 1995). A literatura cita tempos de processamento térmico variando em um intervalo compreendido entre 1 e 3 horas, para obtenção de um produto com características próprias, denominado "madeira torrificada" ou "madeira torrada", como em ARCATE (2002), LIPINSKY et al (2002), PENTANANUNT et al (1990) e KANDPAL & MAHESHWARI (1992).

A variável tempo não foi abordada no trabalho como um parâmetro a ser otimizado no processo, tendo sido adotado o tempo de 15 minutos como o valor a ser adotado tanto em escala laboratorial, como em escala plena.

No entanto, durante os tratamentos térmicos aplicados em escala plena, observou-se que esse tempo poderá variar em função de uma série de fatores relacionados ao processo, tais como:

- Teor de umidade do material utilizado no processo;
- Temperatura no interior do cilindro de torra e temperatura da fornalha durante o processo;
- Quantidade de material dentro do cilindro rotativo.

O controle do processo de torrefação visando a determinação do ponto de torra e a conseqüente abertura do cilindro para descarga do material para a peneira ventilada, encontra-se relacionado nesse tipo de equipamento à avaliação visual do produto no interior do cilindro. Essa avaliação visual pode ocorrer pela visualização da coloração do produto pelo visor de vidro instalado na tampa frontal ou mesmo pela retirada de amostras através de um amostrador manual posicionado na extremidade do cilindro rotativo.

Pode-se indicar um aspecto relevante observado durante a alimentação do forno com os cavacos de madeira, uma vez que foram necessárias interferências dos operadores na passagem do produto entre a moega de alimentação do cilindro e o cilindro rotativo. Foi verificada a formação de "gaiolas", com os cavacos de madeira, que se apresentavam como uma mistura de fragmentos de materiais lenhosos, materiais palhosos e partículas mais finas, favorecendo o "embuchamento". O problema poderá ser facilmente solucionado através de uma adaptação no duto de transferência do produto para o cilindro.

O rendimento energético do processo em escala real apresentou resultados variando entre 96,88% com tratamento dos cavacos realizado à faixa de temperatura de 160 a 180oC e 87,5% à faixa de temperatura de 240 a 260oC, evidenciando uma tendência de diminuição do rendimento do processo à medida que as temperaturas do tratamento iam sendo elevadas. Os valores obtidos não foram conflitantes com os valores pesquisados junto às referências bibliográficas, tais como em LIPINSKY (2002) e ARCATE(2002).

A Tabela 6.1 apresenta valores do poder calorífico inferior de madeira torrificada, obtidos em experimentos de ARCATE (2002), em comparação com os valores obtidos nos experimentos em forno rotativo:

Tabela 6.1 – Valores de PCI em kcal/kg, de produtos obtidos com a torrefação da madeira em diversas temperaturas e tempos de processamento - Comparativo entre o ensaio em escala real e a bibliografia

| Temperatura (°C) | Experimento conduzido por ARCATE/Tempos de processo (A) – PCI (kcal/kg) | | | | | | Experimento em forno rotativo (B) PCI (kcal/kg) | $\left[\frac{(A)}{(B)} - 1 \right] \times 100\%$ |
|------------------|---|-------|-------|-------|-------|-----------|---|---|
| | 3,0 h | 2,5 h | 2,0 h | 1,5 h | 1,0 h | Média (A) | | |
| 200 | 4942 | 5012 | 4850 | 4904 | - | 4927 | 4485 | 9,85% |
| 230 | 5215 | 5194 | 5043 | 5145 | - | 5149 | 4473 | 15,11% |
| 260 | 5440 | 5330 | 5325 | 5201 | 5260 | 5311 | 4461 | 19,05% |

A comparação dos valores de poder calorífico inferior obtidos nos experimentos em forno rotativo com 15 minutos de tempo de processamento, em relação às médias obtidas dos resultados de ARCATE (2002), com tempo de processamento variando de 1,0 hora a 3,0 horas demonstraram um incremento adicional do poder calorífico com o aumento do tempo de detenção variando entre 9,85% de incremento para a temperatura de 200 °C e 19,05% para a temperatura de 260 °C. Cabe salientar que nos experimentos realizados no forno rotativo foram mantidas temperaturas variando nas faixas entre 200 e 220 °C, 220 e 240 °C e 240 e 260 °C respectivamente para cada amostra analisada.

A Tabela 6.2 apresenta valores do poder calorífico inferior da madeira torrificada, obtidos em experimentos em escala laboratorial, com cadinho aberto, em comparação com os valores obtidos nos experimentos em forno rotativo:

Tabela 6.2 – Comparativo do poder calorífico superior e inferior nos experimentos conduzidos em laboratório com cadinho aberto (sem tampa) e em escala real (forno rotativo)

| Tratamento térmico (°C) | PCI (kcal/kg) | | $\left[\frac{(A)}{(B)} - 1 \right] \times 100\%$ | PCS (kcal/kg) | | $\left[\frac{(A)}{(B)} - 1 \right] \times 100\%$ |
|-------------------------|--|---|---|--|--|---|
| | Experimentos conduzidos em laboratório (A) | Experimentos conduzidos em forno rotativo (B) | | Experimentos conduzidos em laboratório (A) | Experimentos conduzidos em escala real (B) | |
| Estufa | | | | 4192 | - | - |
| 140 | 3864 | - | - | 4795 | - | - |
| 180 | 4473 | - | - | 4869 | 4653 | 4,64% |
| 220 | 4549 | 4330 | 5,05% | 5267 | 4785 | 10,07% |
| 260 | 5150 | 4473 | 15,13% | 5356 | 4772 | 12,23% |
| 300 | 5230 | 4461 | 17,23% | 5685 | - | - |
| 300 | 5589 | - | - | | | |

A comparação dos valores de poder calorífico superior e inferior obtidos nos experimentos em forno rotativo e em mufla no laboratório, demonstraram um incremento adicional do poder calorífico para tratamento em laboratório de 4,64% a 17,23%, em relação ao tratamento em forno rotativo. Cabe salientar que para esses resultados dos experimentos realizados no forno rotativo foram mantidas temperaturas variando nas faixas entre 160 e 180 °C, 220 e 240 °C, 240 e 260 °C respectivamente para cada amostra analisada.

A Tabela 6.3 apresenta valores do poder calorífico inferior de madeira torrificada, obtidos em experimentos em escala laboratorial, com cadinho fechado, em comparação com os valores obtidos nos experimentos em forno rotativo:

Tabela 6.3 – Comparativo do poder calorífico superior e inferior nos experimentos conduzidos em laboratório com cadinho fechado (com tampa) e em escala real (forno rotativo)

| Tratamento térmico (°C) | PCI (kcal/kg) | | $\left[\frac{(A)}{(B)} - 1 \right] \times 100\%$ | PCS (kcal/kg) | | $\left[\frac{(A)}{(B)} - 1 \right] \times 100\%$ |
|-------------------------|--|---|---|--|--|---|
| | Experimentos conduzidos em laboratório (A) | Experimentos conduzidos em forno rotativo (B) | | Experimentos conduzidos em laboratório (A) | Experimentos conduzidos em escala real (B) | |
| Estufa | 4156 | - | - | 4469 | - | - |
| 200 | 4565 | 4330 | 5,42 | 4878 | 4653 | 4,83 |
| 210 | 4567 | 4485 | 1,82 | 4886 | 4796 | 1,87 |
| 220 | 4571 | 4473 | 2,19 | 4893 | 4785 | 2,25 |
| 230 | 4573 | 4473 | 2,23 | 4894 | 4785 | 2,27 |

A comparação dos valores de poder calorífico superior e inferior obtidos nos experimentos em forno rotativo e em mufla no laboratório, demonstraram um incremento adicional do poder calorífico para tratamento em laboratório de 1,82% a 5,42%, em relação ao tratamento em forno rotativo. Cabe salientar que para os resultados dos experimentos realizados no forno rotativo foram mantidas temperaturas variando nas faixas entre 160 e 180 °C, 200 e 220 °C, 220 e 240 °C, 240 e 260 °C respectivamente para cada amostra analisada.

Verifica-se que os tratamentos térmicos foram aplicados em partículas de granulometrias diferentes, o que segundo a literatura pesquisada, influi significativamente na perda da umidade, cinética das reações e pode ser determinante para interpretação das diferenças encontradas no comparativo entre os diversos tratamentos. Os perfis de temperatura por sua vez, também não se mostram similares, já que no laboratório os experimentos foram realizados em uma mufla com aquecimento elétrico sem circulação de ar, com pré-secagem da amostra em estufa, enquanto que no forno os cavacos sofreram o tratamento térmico com circulação de ar quente sem a etapa de pré-secagem. Os experimentos descritos por ARCATE (2002), indicam que o tratamento térmico aplicado utilizou vapor superaquecido precedido por uma etapa de secagem.

6.3 Análise comparativa da performance dos combustíveis nos testes de queima e campanhas de amostragens isocinéticas

Os testes de queima realizados em um forno de uma unidade de panificação demonstraram diferentes performances para os três combustíveis testados. O forno encontrava-se em regime normal de produção de pães e produtos de confeitaria e o calor fornecido pela fornalha deveria manter as câmaras do forno operando a uma temperatura ente 180 °C e 200 °C. A fornalha possuía opção para alimentação manual, para utilização de lenha, ou alimentação automática através de transportador helicoidal. O alimentador possuía opção de ventilação automática através de transportador helicoidal. O alimentador possuía opção de ventilação forçada através do acionamento de um ventilador centrífugo, além da regulagem de quatro velocidades de alimentação. Optou-se pela não utilização de ventilação forçada no alimentador automático, para que as condições fossem similares entre a combustão dos cavacos (cru ou torrado) e da lenha. A combustão desses materiais pode ser observada nas Figuras 6.2 e 6.3.

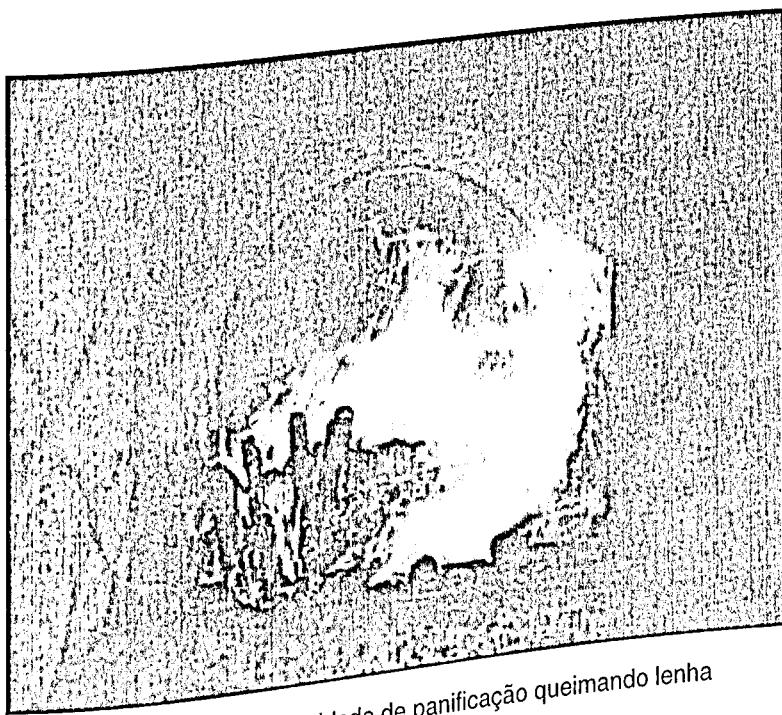


Figura 6.2 - Forno da unidade de panificação queimando lenha

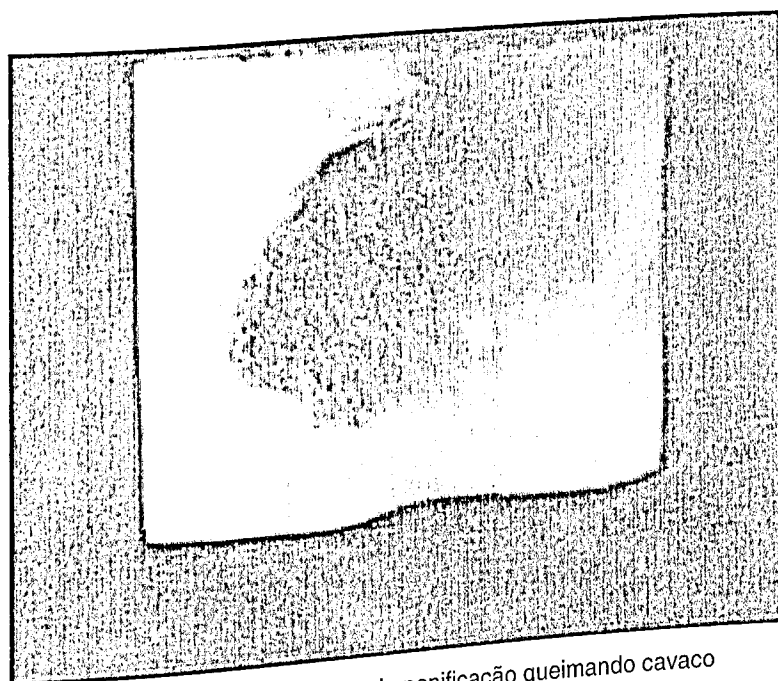


Figura 6.3 - Forno da unidade de panificação queimando cavaco

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

Durante a alimentação do cavaco tratado a $160 - 180^{\circ}\text{C}$ foram verificados alguns problemas operacionais no transportador helicoidal do sistema de alimentação, o qual travou em diversas oportunidades, obrigando o operador a interferir nos mecanismos de acionamento e regulagem. Na primeira e na segunda campanha de amostragem, o combustível, possivelmente em função dos problemas apresentados na alimentação, não conseguiu manter a temperatura das câmaras do forno acima de 180°C , ocasionando queda do rendimento do processo de produção e riscos associados à perda da qualidade dos produtos. Essas verificações foram acompanhadas da queda da temperatura dos gases de exaustão na chaminé. Os travamentos do transportador helicoidal foram atribuídos ao excesso de finos e materiais palhosos, os quais se adensavam e provocavam um embuchamento no sistema.

A alimentação da fornalha com o cavaco torrado apresentou problemas na regulagem da velocidade de alimentação. Mesmo na menor velocidade a quantidade de cavaco torrado introduzido na fornalha se mostrou superior à quantidade necessária ao suprimento de calor para as câmaras do forno. Em algumas medições, a temperatura dos gases de exaustão na chaminé ultrapassou 300°C , confirmando as perdas de processo com a elevação da temperatura dos gases de exaustão. Atribuiu-se ao melhor escoamento do cavaco torrado na rosca helicoidal, a expressiva redução dos finos e dos materiais palhosos, eliminados nas etapas de tratamento térmico e resfriamento em peneira ventilada, quando do processamento do produto a faixas superiores de temperatura. Como não houve substituição da grelha na fornalha para queima dos cavacos de madeira por uma de menor espaçamento, em ambos os casos ocorreu a passagem desses materiais da grelha para o cinzeiro antes que a combustão

fosse completada. Esse fato pode ter interferido na performance desses combustíveis uma vez que não se completou a combustão em parte do material, ocorrendo o processo de carbonização no cinzeiro da fornalha.

A Tabela 6.4 e as Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 indicam as médias de concentração de material particulado obtidas nas amostragens dos combustíveis avaliados, em relação ao padrão especificado na legislação ambiental vigente no estado de Minas Gerais. Como a Deliberação Normativa 011/86 do COPAM não impõe a correção das emissões para uma mesma base de O_2 ou "ar em excesso", não foram corrigidos os resultados para uma mesma base na avaliação do atendimento aos limites da legislação ambiental.

Tabela 6.4. – Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com diversos combustíveis

| Combustível | Resultado (mg/Nm ³) | | | | Padrão ⁴⁰ |
|----------------|---------------------------------|------------|------------|----------|----------------------|
| | 1ª amostra | 2ª amostra | 3ª amostra | Média | |
| Cavaco torrado | 161,5965 | 121,1749 | 126,8179 | 136,5289 | 150,0 |
| Cavaco cru | 82,8267 | 97,7938 | 153,1684 | 202,8685 | 150,0 |
| Lenha | 133,1901 | 154,1283 | 321,2872 | | |

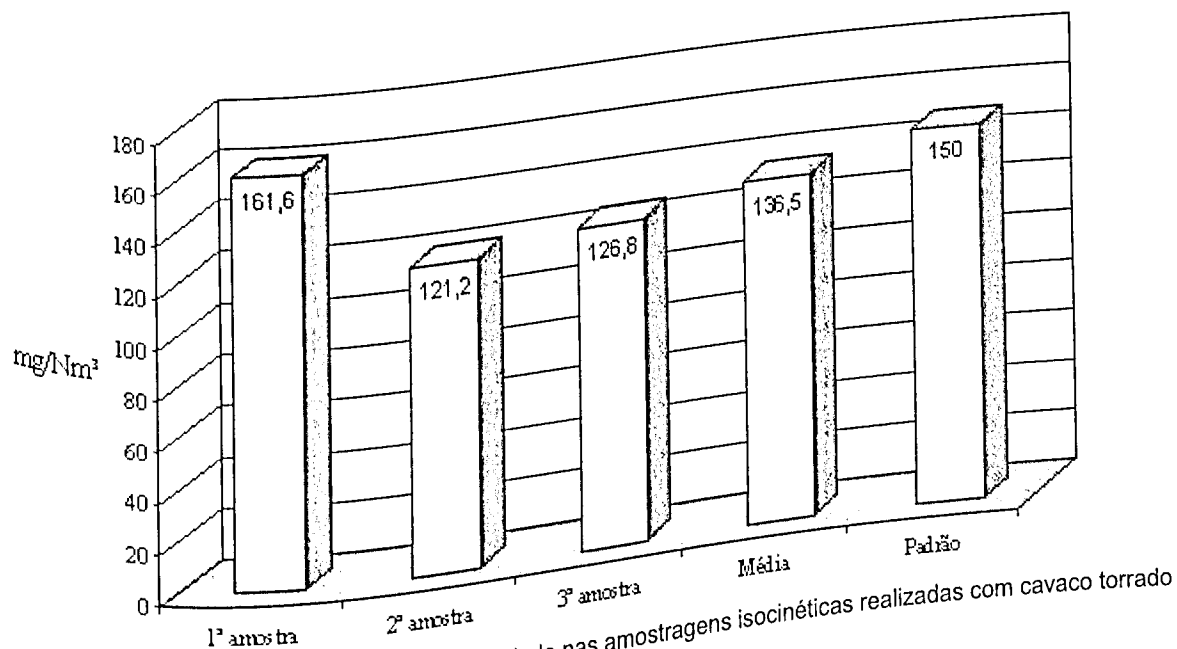


Figura 6.4 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com cavaco torrado

⁴⁰ Deliberação Normativa nº 11/86 - Conselho Estadual de Política Ambiental
Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG

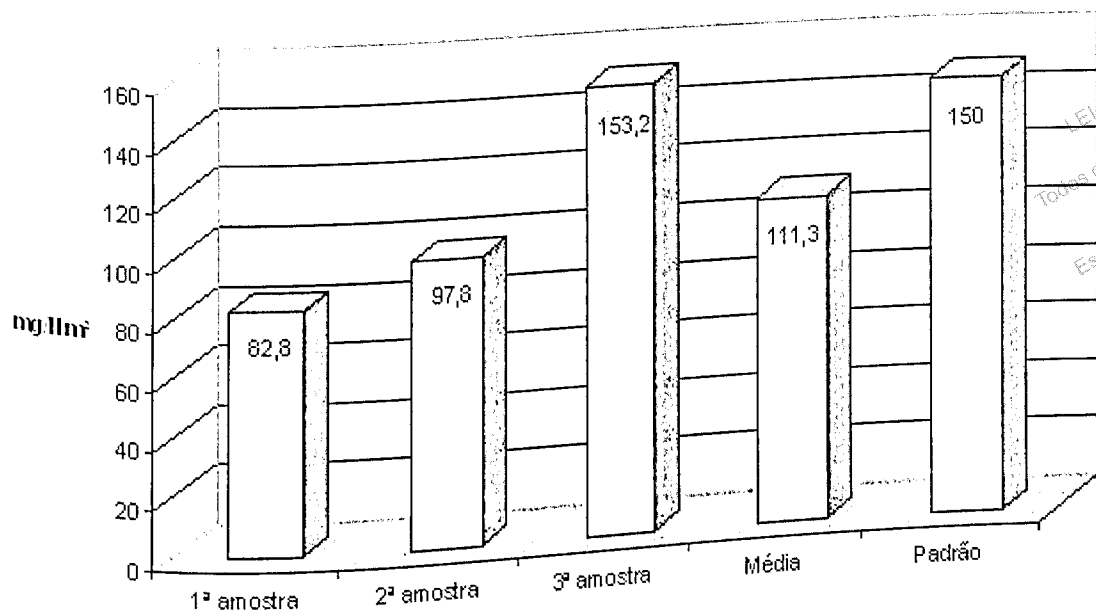


Figura 6.5 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com cavaco cru

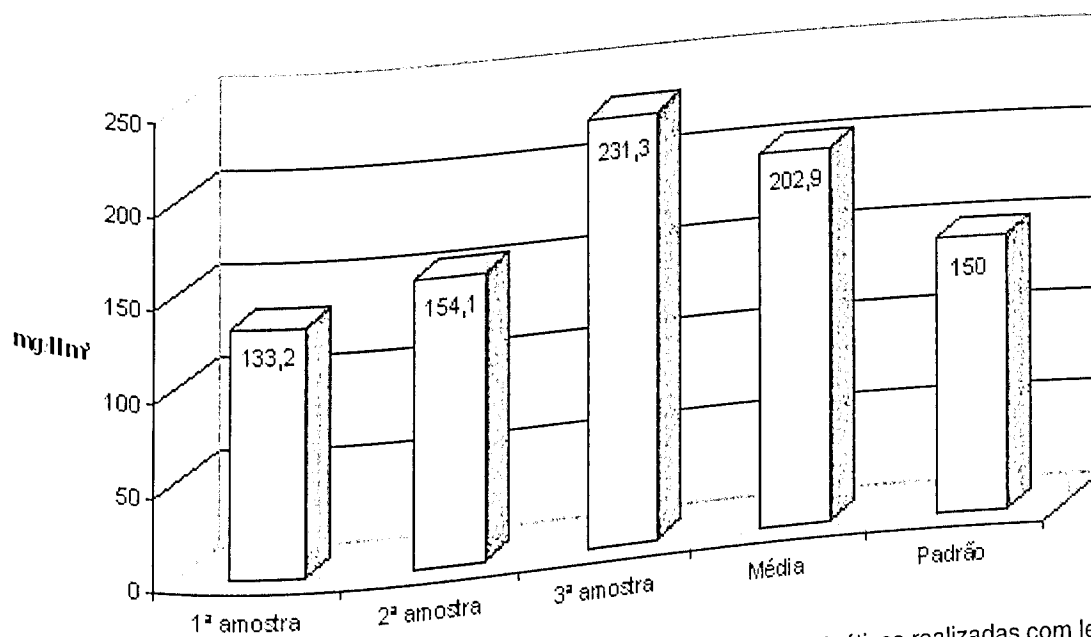


Figura 6.6 - Concentração de material particulado nas amostragens isocinéticas realizadas com lenha

O atendimento ao padrão foi verificado com a utilização do cavaco cru e do cavaco torrado durante os testes de queima realizados. No entanto, o cavaco cru não se apresentou como um combustível que possibilitasse a manutenção das condições ideais para o desenvolvimento do processo produtivo, verificados os problemas operacionais ocorridos para manutenção da temperatura nas câmaras do forno. Para melhor avaliação da taxa de geração de partículas no fluxo gasoso proveniente da queima, a Tabela 6.5 apresenta a taxa de geração por quilo de combustível aplicado.

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS E PROTEGIDOS
 PELA LEI 9.610/1998.
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou
 transmitido sejam quais forem os meios
 empregados: eletrônicos, mecânicos,
 fotográficos ou quaisquer outros.

Tabela 6.5. – Taxa de geração de material particulado por quilo de combustível aplicado em fornalha durante teste de queima

| Combustível | Início teste (h) | Final teste (h) | Peso total (kg) | Peso sobra (kg) | Consumo total (kg) | Consumo por hora (kg/h) | Taxa de emissão de material particulado - média (g/h) | Taxa de geração de material particulado/kg combustível (g/kg) |
|----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------------|---|---|
| Cavaco torrado | 14:41 | 18:37 | 112,225 | 2,220 | 110,005 | 28,56 | 49,53 | 1,73 |
| Cavaco cru | 9:51 | 14:19 | 95,090 | 26,850 | 68,240 | 15,28 | 42,43 | 2,77 |
| Lenha | 9:44 | 14:16 | 76,860 | 2,850 | 74,010 | 16,33 | 74,7 | 4,57 |

Os resultados apresentados na tabela 6.5 evidenciam a característica do cavaco torrado de produzir uma menor quantidade de partículas a serem carregadas pelo fluxo gasoso da exaustão, em relação aos outros combustíveis sólidos avaliados no teste de queima. Vale salientar que a observação da composição dos gases de exaustão dos três combustíveis testados indica que uma menor quantidade de "ar em excesso" foi introduzida na queima do cavaco torrado, o que se constitui em fator determinante para se obter uma atmosfera de combustão mais rica em comparação às outras campanhas, favorecendo a formação de uma maior quantidade de material particulado.

7 CONCLUSÕES

A alternativa para substituição da queima de combustíveis fósseis por outra matriz energética pode se tornar vantajosa tanto em relação aos aspectos econômicos como pode trazer benefícios ambientais significativos. Em se tratando da reciclagem de resíduos aliada ao aspecto de substituição de fontes energéticas, as vantagens podem tornar-se ainda maiores.

As tecnologias propostas para o processamento dos resíduos, de acordo com o fluxo dos materiais nas operações e processos realizados neste trabalho, demonstram uma necessidade ainda de um aprimoramento técnico e pesquisas complementares envolvendo a otimização para aplicação em escala industrial.

O conjunto utilizado no tratamento mecânico, projetado para operar fragmentando lenha em toras, foi operado com limitações, ora em função da desuniformidade das peças, ora em relação à presença de elementos metálicos que poderiam danificar os componentes mecânicos do picador (facas do tambor rotativo). A queda no rendimento industrial foi observada, apesar da solução encontrada de se serrar partes da madeira com presença de elementos metálicos. Essas partes podem ser aproveitadas para alimentação da fornalha do forno rotativo.

O forno rotativo sofreu limitações no rendimento industrial relacionadas ao tempo de alimentação do cilindro rotativo. Os cavacos de madeira durante as operações de transferência entre a moega de recepção e a moega de alimentação fluíram normalmente. Da moega de alimentação para o cilindro, no entanto, as operações sofreram uma série de interrupções, com necessidade de intervenções constantes dos operadores para desobstrução de dutos de interligação, obstruídos pela formação de "gaiolas" pelos cavacos. A operação de torrefação no cilindro, bem como o resfriamento em peneira ventilada demonstraram que as estruturas utilizadas são adequadas para o tipo de uso proposto. Uma constatação relevante diz respeito à etapa posterior ao resfriamento, uma vez que a superfície dos cavacos após o resfriamento voltou a aquecer-se, indicando um risco de combustão espontânea, caso o produto seja ensacado imediatamente após o resfriamento.

O processamento industrial proposto atendeu às expectativas quanto ao incremento do poder calorífico do material processado, bem como conferiu ao produto obtido características similares àquelas descritas na literatura técnica consultada em relação à madeira torrificada. A significativa redução do tempo de processamento térmico de uma a três horas, como recomenda a literatura para 15 minutos, assim como a supressão da etapa de pré-secagem do

material lenhoso antes do tratamento térmico são inovações propostas neste trabalho visando uma redução de custos de processo.

O produto obtido na reciclagem dos resíduos de madeira demonstrou aplicabilidade, levando em consideração vários aspectos tais como:

- poder calorífico compatível com os processos de geração de energia térmica e suas aplicações;
- facilidade no acondicionamento, transporte, armazenamento e estocagem;
- rendimento térmico superior a lenha ou resíduos de madeira sem processamento;
- baixo teor de umidade e baixa higroscopicidade;
- possibilidade de automação do sistema de alimentação de combustível;
- maior resistência a ação de agentes biológicos durante o período de estocagem;
- desempenho satisfatório na combustão;
- possibilidade de utilização sem a adoção de dispositivos de tratamento de gases.

Dessa forma, o presente estudo visa contribuir para o desenvolvimento de um processo viável de obtenção de um combustível alternativo a partir da utilização de resíduos de madeira, ainda que pesquisas complementares associadas a otimização dos processos sejam recomendáveis, antes da adoção dessa tecnologia no planejamento de unidades industriais que objetivarem a fabricação desse produto e o conseqüente ingresso no promissor mercado de fornecimento de combustíveis sólidos para fontes de geração de energia térmica.

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este trabalho não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

8 RECOMENDAÇÕES

Por se tratar de um trabalho de pesquisa aplicada, justifica-se a recomendação da continuidade das pesquisas quanto a inclusão ou supressão de etapas, além da necessária otimização dos processos, pela busca da melhoria contínua da eficiência.

Por se tratar de proposta de utilização de resíduos de madeira, a tecnologia desenvolvida poderá também ser aplicada, mediante pesquisas complementares, em madeira extraída de florestas plantadas ou de áreas de manejo sustentável exploradas com a finalidade de suprimento energético. Cabe salientar que cuidados deverão ser tomados para que a tecnologia não se transforme em um incentivo ao deflorestamento de regiões com tendência para ocorrência de problemas em relação à exploração indiscriminada de florestas nativas.

Recomenda-se para a adoção das técnicas desenvolvidas no presente trabalho, para assegurar um melhor desempenho aos processos e garantir as características fundamentais ao produto desejado que: (1) as matérias-primas com umidade superior a 20% sejam submetidas a um processo de secagem natural no campo por período superior a 60 dias, antes de serem submetidas ao tratamento mecânico, (2) eliminação dos elementos metálicos (pregos, grampos, arames) dos resíduos antes do encaminhamento ao tratamento mecânico, (3) os resíduos de madeira com características dimensionais inadequadas (grandes dimensões) para ingresso no picador rotativo deverão ser submetidas a uma operação preliminar para divisão em partes menores em um rachador hidráulico, (4) os resíduos de madeira com características dimensionais inadequadas (pequenas dimensões) para ingresso no picador rotativo poderão ser utilizadas como combustível na fornalha do forno rotativo, (5) evitar o processamento de resíduos que contenham produtos estranhos ao material tais como tintas, defensivos, vernizes, entre outros, (6) o forno cilíndrico rotativo deverá ser dotado de dispositivos de controle ambiental que assegurem o atendimento aos limites de lançamentos impostos pela legislação ambiental vigente, (7) após a etapa de resfriamento em peneira ventilada o produto deverá permanecer em observação em função do risco de combustão espontânea, (8) a planta industrial deverá ser dotada de sistema de prevenção de combate a incêndio, (9) a equipe de produção deverá receber treinamento específico sobre os riscos ocupacionais inerentes à atividade e utilização de equipamentos de proteção individual e coletiva.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. *O processo de carbonização contínua da madeira*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 143-156.

ARCATE, J.R. *Torrefied Wood, an Enhanced wood fuel*. Idaho, USA. Bioenergy, Setembro, 2002. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: amostragem de resíduos – procedimento. Rio de Janeiro, 1989. 25 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10700: planejamento de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias – procedimentos. Rio de Janeiro, 1989. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10701: determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias - procedimento. Rio de Janeiro, 1989. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10702: efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação da massa molecular – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11906: efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação da velocidade e vazão – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11967: efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação da umidade – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12019: efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – determinação de material particulado – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12020: efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – calibração dos equipamentos utilizados em amostragem – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12827: efluentes gasosos com sistema filtrante no interior do duto ou chaminé de fontes estacionárias – determinação de material particulado. Rio de Janeiro, 1993. 12 p.

BARROS, R.T. de. *Resíduos sólidos*. Belo Horizonte, Minas Gerais. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, apostila, 1996. 51 p.

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
de acordo com a Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
e métodos empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução CONAMA nº 08, de 06 de dezembro de 1990 – Estabelece limites máximos de emissão previstos no PRONAR. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 28 de dezembro de 1990.

D'ÁVILA, S. G.; MAKRAY, Z. T. *Gaseificadores de madeira – Aspectos técnicos e econômicos*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológica de Minas Gerais, 1981. p. 73-80.

DINIZ, V. Y. *Caldeiras a lenha*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1981. p. 113-131.

DREW, D., *Processos Interativos Homem-Meio Ambiente*, 2ª ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil S.A., 1989. 206 p.

EVANS, G. *Biowaste and Biological Waste Treatment*. Londres: James e James Science Publishers Ltda, 2001. 194 p.

EVANS, R. R.; ZARADIC A. M. Optimization of wood waste fuelled in indirectly fired gas turbine cogeneration plant. *Bioresource Technology*, n. 57, p. 117-126. 1996.

FELLENBERG, G., *Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental*, São Paulo: Ed. Pedagógica e Universitária Ltda, 1980. 196 p.

FERREIRA, J. B. *Dicionário de Geociências*. Ouro Preto. Fundação Gorceix. 1980. 550 p.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Iniciação ao Desenvolvimento Sustentável*. Belo Horizonte. Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2003. 464 p.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. *Secagem Racional da Madeira*, São Paulo: Livraria Nobel, 1985. 111 p.

JIRJIS, R. *Storage and drying of wood fuel*. Biomass and bioenergy. Great Britain. Elsevier Science Publishers. Vol. 9. Nºs 1 – 5. 1995. P. 181-190.

KANDPAL, J.B. e MAHESHWARI, R.C. – *A decentralized approach for biocoal production in a mud kiln*. Great Britain. Elsevier Science Publishers. 1993. p. 99 – 102.

LEME, F. P. *Engenharia de Saneamento Ambiental*. 2ª edição. Rio de Janeiro. LTC. 1984. 358 p.

LEVANDER, T. *The relative contributions to the greenhouse effect from the use of different fuels*. Atmospheric Environment. Great Britain Pergamons Press. Vol. 24 A. nº11. p. 2.707 – 2.714. 1990

LIPINSKY, E.S; ARCATE, J,R.; REED, T.B. *Enhanced wood fuels via torrefaction*. Fuel chemistry Division Preprints. USA. 47 (1). 2002.

LEI Nº 9.610/1998
DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

- MANCINTYRE, A.J. *Ventilação industrial e controle da poluição*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1988. 403 p.
- MATOS, M. *Características dos produtos da carbonização da madeira*. In: Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 35-44.
- MESQUITA, A.L.S.; GUIMARÃES, F.A.; NEFUSSI, N. *Engenharia de ventilação industrial*. São Paulo: CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1985. 442 p.
- MENDES, M. G, GOMES, P. A. e OLIVEIRA, J.B. *Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológica de Minas Gerais, 1982., p. 75-90.
- MINAS GERAIS, Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa COPAM n. 11, de 16 de dezembro de 1986. Estabelece normas e padrões para emissão de poluentes na atmosfera e dá outras providências. *Diário Oficial de Minas Gerais*, Belo Horizonte, MG, 10 jan. 1987.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balanco energético nacional*. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/ben/destaques.pdf>> Acessado em: 11 jun, 2004.
- MITRE, M. N. *Caldeiras para queima de madeira e bagaço*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 319-348.
- NEIVA, J., *Fontes alternativas de energia: conservação de energia, gás natural, biomassa – carvão vegetal, álcool etílico - e xisto*, 2a ed. Atual e ampliada, Rio de Janeiro: Maity Ed., 1987. 155 p.
- PENTANANUNT, R.; RAHMAN, A. N. M. M.; BHATTACHARYA, S. C. *Upgrading of Biomass by Means of Torrefaction*, v. 15, n.12, p. 1175-1179, 1990.
- PETERS, B e BRUCH, C. *Drying and pyrolysis of wood particles: experiments and simulation*. *Ensevier science. Journal of analytical and applied pyrolysis*. 70 (2003). p. 233–250.
- PINHEIRO, P. C. C., *Utilização de combustíveis alternativos em caldeiras*. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 4., 1992, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1992. p. 69-71.
- PINHEIRO, P. C. C., *Controle de combustão: Otimização do excesso de ar*. In: Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica, 2., 1995, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, 1995. p. 157-162.

LEI DO DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.

POGGIANI, F. *Ciclagem de nutrientes e manutenção da produtividade da floresta plantada*. Belo Horizonte. Seminário "Gaseificação de madeira e carvão vegetal". Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – Coletânea de trabalhos, 1981. p. 25–33.

PROBSTEIN, R. F.; HICKS, R. E. *Synthetic fuels*, 2nd ed., São Paulo: Mcgraw-Hill Book Company, 1985. 490 p.

REZENDE, C. G. *Implantação e produtividade de florestas para fins energéticos*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológica de Minas Gerais, 1982., p. 9-24.

ROCCA, A. C. C.; IACOVONE, A. M. M. B.; BARROTTI, A. J.; CASARINI, D. C. P.; GLOEDEN, E.; STRAUS, E. L.; ROMANO, J. A.; RUIZ, L. R.; SILVA, L. M.; SAITO, L. M.; PIRES, M. C.; LEÃO, M. L. G.; CASTRO NETO, P. P.; COLLUCCI, R.; CUNHA, R. C. A. *Resíduos Sólidos Industriais*, 2^a ed. rev. ampl., São Paulo: CETESB, 1993. 234 p.

SHREVE, R. N.; BRINK JR., J. A. *Indústrias de Processos Químicos*, 4^a ed., Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 1977. 717 p.

SKODRAS, G., GRAMMELIS, P., KAKARAS, E. e SAKELLAROPOULOS, G. P. *Evaluation of the environmental impact of waste wood co-utilisation for energy production*. Grã-Bretanha. Energy. Elsevier Science Publishers. 2004. 13 p.

TILLMAN, D.A. *Biomass cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences*. Grã Bretanha. Biomass and Bioenergy, p. 365-384, 2000.

TILLMAN, D.A.; GOLD, B. A. *Wood cofiring evaluation at TVA power plant*. Grã Bretanha. Biomass and Bioenergy, v. 10, p. 71-78, 1996.

TORREIRA, R. P. *Geradores de Vapor*. São Paulo. Companhia Melhoramentos. 1995. 710 p.

TURNBULL, J. H. *Use of Biomass in Electric Power Generation: The California Experience*. Grã Bretanha. Biomass and Bioenergy. Vol. 4, n° 2. 1993. p. 75-84.

VIVACQUA FILHO, A.; OLIVEIRA, J.B. de; MENDES, M.G; GOMES, P.A. *Produção de Carvão Vegetal – Aspectos Técnicos*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Série Técnica, 1982. p. 61 – 73.

DIREITO AUTORAL
Todos os direitos reservados e protegidos
pela Lei 9.610/1998.
Este arquivo não pode ser reproduzido ou
transmitido sejam quais forem os meios
empregados: eletrônicos, mecânicos,
fotográficos ou quaisquer outros.