

MARCO TÚLIO CARDOSO

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE FORNO-FORNALHA PARA  
COMBUSTÃO DE GASES NA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-graduação em Ciência Florestal,  
para obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010

MARCO TÚLIO CARDOSO

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE FORNO-FORNALHA PARA  
COMBUSTÃO DE GASES NA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-graduação em Ciência Florestal,  
para obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

Aprovada: 26 de fevereiro de 2010

---

Prof. Benedito Rocha Vital  
(Co-orientador)

---

Prof. Ana Márcia M. L. Carvalho  
(Co-orientadora)

---

Prof. José de Castro Silva

---

Prof. Laércio A. G. Jacovine

---

Prof. Angélica de Cássia O. Carneiro  
(Orientadora)

À minha filha Júlia Lima Cardoso,  
nascida em 15 de julho de 2006,  
responsável por essa realização.

## **AGRADECIMENTOS**

### **A DEUS**

À Universidade Federal de Viçosa, pela formação acadêmica

Ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de aprendizado.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de mestrado e pelo financiamento da pesquisa.

À empresa PLANTAR, pela doação da madeira.

À empresa ArcelorMittal Bioenergia, pelo projeto de construção da fornalha.

À Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, pela amizade, acolhimento, respeito, confiança e dedicação.

Aos Professores Benedito Rocha Vital e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, pelas orientações e apoio.

Ao Professor Laércio Antônio Gonçalves Jacovine, pela preocupação e ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Ao Daniel Câmara Barcellos, pelas orientações imprescindíveis no decorrer da pesquisa.

Ao professor José de Castro Silva, pelo apoio e participação na banca.

Ao professor Márcio Arêdes por auxiliar nas análises dos dados.

Ao amigo Renato Augusto Pereira Damásio, pela dedicação na execução dos trabalhos.

Ao Sr. Maninho, pela ajuda imprescindível em todo trabalho.

Aos amigos do LAPEM: Sr. Zé Maria, Aristeu, Moiado, Bráulio, Fábio, Alberto e todos que contribuíram para realização da pesquisa.

Aos meus pais, Júlio Alberto Cardoso e Elisabete Barbosa Cardoso, pelo apoio e incentivo.

Aos meus irmãos André Luiz Cardoso e Juliana Paula Cardoso Bhering.

À minha esposa Marquione Fátima Lima Cardoso, por estar do meu lado nos momentos de felicidade e de dificuldade.

Aos meus sobrinhos Rafael e Gabriela

À Casa do Caminho Bezerra de Menezes por me tornar uma pessoa melhor.

A todos que, de algum modo, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

MARCO TÚLIO CARDOSO, filho de Júlio Alberto Cardoso e Elisabete Barbosa Cardoso, nasceu em 30 de abril de 1985, na cidade de Viçosa, Estado de Minas Gerais.

No ano de 2003, ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em janeiro de 2008.

Em março de 2008, ingressou no Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, em nível de Mestrado, na área de Tecnologia da Madeira, na Universidade Federal de Viçosa.

## CONTEÚDO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1. Carbonização da madeira.....	4
3.2. Fornos para produção de carvão vegetal.....	6
3.3. Fornalhas para combustão dos gases da carbonização.....	8
3.3.1. Combustão.....	8
3.3.2. Fornalhas.....	10
3.3.3. Dimensionamento de fornalhas.....	11
3.4. Materiais isolantes.....	12
3.5. Aspectos ambientais da produção de carvão vegetal.....	13
3.5.1. Mercado de créditos de carbono.....	15
3.6. Qualidade do carvão vegetal.....	17
3.6.1. Propriedades do carvão vegetal.....	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1. Local.....	22
4.2. Projeto e dimensionamento do sistema de queima de gases da carbonização.....	22
4.3. Madeiras utilizadas para carbonização.....	26

4.3.1. Caracterização das madeiras.....	27
4.4. Carbonização da madeira.....	27
4.4.1. Carregamento do forno.....	27
4.4.2. Ignição e controle da carbonização.....	28
4.4.3. Queima dos gases na fornalha.....	28
4.4.4. Fechamento e resfriamento do forno.....	29
4.4.5. Abertura e descarga do carvão.....	29
4.5. Amostragem do carvão para análises.....	29
4.6. Rendimento gravimétrico da carbonização.....	30
4.7. Propriedades do carvão vegetal.....	31
4.8. Coleta e análise dos gases.....	32
4.9. Delineamento estatístico.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1. Propriedades das madeiras utilizadas nas carbonizações.....	35
5.2. O processo de carbonização.....	35
5.3. Carbonização da madeira.....	37
5.3.1. Carbonização com madeira de café.....	37
5.3.1.1. Rendimento gravimétrico da carbonização com madeira de café.....	38
5.3.1.2. Propriedades do carvão da madeira de café.....	38
5.4. Carbonização com madeira de <i>Eucalyptus</i> sp.....	40
5.4.1 . Carbonização com combustão dos gases.....	40
5.4.2. Carbonização sem combustão dos gases.....	42
5.4.3. Rendimento gravimétrico das carbonizações com madeira de <i>Eucalyptus</i> sp.....	43
5.4.4. Propriedades do carvão vegetal da madeira de <i>Eucalyptus</i> sp.....	45
5.5. Análise dos gases da carbonização.....	46
5.5.1. Redução da massa de metano com a combustão dos gases.....	53
6. CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS.....	55
ANEXO.....	63



## RESUMO

CARDOSO, Marco Túlio, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro, 2010, **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira** . Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-orientadores: Benedito Rocha Vital e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

O objetivo do trabalho foi avaliar um sistema de forno-fornalha para carbonização da madeira com combustão dos gases, visando a redução da emissão de poluentes sem perdas de rendimento e qualidade do carvão produzido. Primeiramente foi realizada uma carbonização com madeira de café, para testar o funcionamento da fornalha para combustão dos gases. Observou-se que os gases são queimados com eficiência a partir da temperatura de 120°C. Posteriormente foram realizadas mais quatro carbonizações com madeira de *Eucalyptus* sp., duas utilizando a fornalha para oxidar os gases e outras duas sem a combustão dos gases da carbonização, sendo que em uma delas com e sem combustão dos gases foi realizada a coleta dos gases, para posterior análise qualitativa e quantitativa, através de cromatografia gasosa. A temperatura final das carbonizações variou de 450 a 500°C, tendo duração de aproximadamente 52 horas. Foram avaliados o rendimento gravimétrico e as seguintes propriedades do carvão: teor de umidade, densidade à granel, densidade relativa aparente, friabilidade, poder calorífico superior, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo. De acordo com os resultados, não houve diferença significativa entre as carbonizações com e sem a fornalha em funcionamento para rendimento gravimétrico em carvão, porém os rendimentos em “tiço” e finos foram influenciados, sendo que nas carbonizações com combustão de gases estes parâmetros foram

inferiores. Quanto às propriedades físicas dos carvões, observou que o teor de umidade, densidade à granel, densidade relativa aparente e teor de cinzas não foram influenciadas pelo uso da fornalha; para o teor de carbono fixo e poder calorífico superior o carvão produzido com combustão de gases foi superior. Os resultados das análises dos gases mostraram uma redução de 96,95% de metano e 93,76% de monóxido de carbono com a queima dos gases pela fornalha. Conclui-se que a combustão dos gases da carbonização da madeira pela fornalha é um sistema eficiente, com menor emissão de gases poluentes e que não acarreta perda de rendimento em carvão, porém as propriedades químicas do carvão podem sofrer alguma influencia devido à forma de condução do forno, uma vez que a combustão dos gases aumenta a velocidade de carbonização.

## ABSTRACT

CARDOSO, Marco Túlio, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2010, **Performance of a system oven-furnace for combustion of gases from wood carbonization.** Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-advisors: Benedito Rocha Vital and Ana Márcia Macedo Ladeira Cavalho.

The objective of this research was to evaluate a system oven-furnace for burning gas from wood carbonization to reduce pollutant emissions without loss of coal yield and quality. To adjust the furnace operation a trial was carried out charring wood coffee. It was observed that the gases are burned efficiently at the temperature of 120°C. Later four carbonizations were realized with *Eucalyptus sp.* Wood. During two carbonizations the gases were oxidize while in two others carbonizations the gases were not burned. Combustion gases were collected for analysis by gas chromatography. The final carbonization temperature ranged from 450 to 500°C after approximately 52 hours. Gravimetric yield and moisture content, bulk density, apparent relative density, friability, gross calorific value, volatiles content, ash and fixed carbon content were determined. It was not observed significant difference for gravimetric yield in coal between the carbonizations with or without the furnace running. However the amount of wood residues was affected. The amount of residues from carbonizations were the gases were burned was smaller. Charcoal physical properties such as moisture content, bulk density, apparent relative density and ash content were not influenced by the use of the furnace. However, it was obtained charcoal higher fixed carbon content and heating value when combustion gases were burned. Gases analysis indicated a reduction from 96.95% to 93.76% of methane and carbon monoxide by the burning the carbonization

gases. It is concluded that the furnace combustion of wood carbonization gases is efficient. Less polluting gases are emitted and there is no yield lost in coal production. However, coal chemical properties may be affected by furnace control since the combustion of gases increases the carbonization speed.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é responsável por 40% da produção mundial de carvão vegetal, tendo como destino principal a produção de ferro gusa, aço, ferro ligas e silício metálico, e, em 2008, o país consumiu cerca de 34 milhões de m<sup>3</sup> de carvão vegetal. Ressalta-se que o Estado de Minas Gerais detém o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo e tem se destacado como o maior produtor e consumidor desse insumo energético, atingindo a marca de 21,908 milhões de mdc, no ano de 2007, correspondendo a 59,67% do total produzido (AMS, 2009). Vale salientar que o setor de base florestal participa com 7% do PIB mineiro (ASSIS, 2003), e visto a importância para o Estado, criou-se, em 2007, o Polo de Excelência em Florestas, com sede na Universidade Federal de Viçosa, como um instrumento de apoio ao desenvolvimento desse importante segmento.

Os dois grandes problemas envolvidos com o carvão vegetal ligam-se à questão da tecnologia empregada na sua produção, envolvendo também a questão ambiental e a matéria-prima que lhe deu origem.

A maior parte do carvão vegetal produzido atualmente no Brasil é proveniente de fornos rudimentares de baixo rendimento e sem controle de emissões atmosféricas, causando impactos econômicos, sociais e ambientais.

Deste modo, o desenvolvimento de fornos com tecnologias de baixo custo de aquisição e que aumentem seu rendimento em produção, além de recuperarem ou queimarem os gases da carbonização, reduzindo a poluição, para pequenos produtores de carvão vegetal e empresas de menor porte, é imprescindível, uma vez que grande parte da produção nacional provém destes pequenos produtores e empresas.

A redução das emissões de gases de efeito estufa na carbonização, pela sua combustão, além das vantagens para o meio ambiente, pode ser economicamente

interessante pela possibilidade de gerar projetos de créditos de carbono, pois há nesse processo redução da emissão, principalmente, de metano, cerca de 21 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono (Van ELK, 2010).

Além disso, para obtenção de carvão de qualidade, aliado às tecnologias de redução de emissão de gases de efeito estufa, é importante observar a qualidade da matéria-prima, ou seja, a madeira que será convertida em carvão deve ser uniforme quanto às dimensões, composição química, densidade e teor de umidade.

Assim, o desenvolvimento de uma fornalha capaz de queimar os gases da carbonização, em fornos de alvenaria, torna-se um passo importante para uma nova perspectiva para produção de carvão vegetal, buscando mitigar os impactos negativos e otimizar a produção e a qualidade do carvão vegetal.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar um sistema de forno com uma fornalha para combustão dos gases da carbonização que possibilite redução da emissão de poluentes, tornando o processo de carbonização mais eficiente do ponto de vista tecnológico e ambiental.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Construir e avaliar o funcionamento de uma fornalha para combustão de gases da carbonização e seus possíveis efeitos no rendimento e qualidade do carvão vegetal produzido.
- Quantificar e avaliar os gases produzidos durante o processo de carbonização com e sem a fornalha em funcionamento, através de cromatografia gasosa.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. Carbonização da madeira**

A carbonização é um processo em que a madeira é submetida a tratamento térmico sob temperaturas elevadas, numa atmosfera redutora controlada (ALMEIDA e REZENDE, 1982).

A carbonização, portanto, é um processo de pirólise lenta, cujo objetivo principal é eliminar a maior parte do oxigênio e do hidrogênio pela ação do calor e, com isso, possibilitar a concentração do carbono na estrutura residual, que é o carvão vegetal. A transformação da madeira em carvão vegetal é um processo de decomposição térmica físico-química irreversível, que se inicia com a secagem, com a perda de água livre ou capilar e água de adesão. Após a retirada da água, inicia-se a fase de pirólise, com a produção de gases condensáveis e não condensáveis (VALE e GENTIL, 2008).

Para se compreender bem o processo de carbonização da madeira, é preciso conhecer a madeira e sua composição. A madeira é constituída por celulose, hemicelulose, lignina e extrativos. A celulose é o composto orgânico mais abundante no planeta, é um polímero composto por unidades de D-glicopiranoose, interligadas por ligações glicosídicas beta 1-4, formando longas cadeias; e sua proporção na madeira é de 40 a 45%. As hemiceluloses são polímeros de várias unidades de açúcares diferentes, originando cadeias ramificadas, correspondendo de 15 a 25% da madeira. As ligninas são moléculas amorfas, altamente complexas, cujo polímero é formado principalmente por unidades aromáticas de fenilpropano, considerado uma substância incrustante, tendo uma proporção de 18 a 25% nas folhosas e 25 a 35% nas coníferas. Os extrativos são compostos químicos da parede celular, geralmente formados a partir de graxas, ácidos



graxos, álcoois graxos, fenóis, terpenos, esteróides, resinas ácidas, resinas, ceras, e alguns outros tipos de compostos orgânicos (ROWELL et al., 2005).

Cada constituinte da madeira comporta-se diferentemente diante do processo de carbonização, devido à natureza de sua composição química. A celulose processa-se rapidamente em um curto intervalo de temperatura, cerca de 50°C, provocando drásticas mudanças no seu comportamento, com a perda de aproximadamente 77% do seu peso. As hemiceluloses começam a perder peso em temperaturas próximas a 225°C, sendo este o componente menos estável da madeira, uma vez que sua degradação é quase total na temperatura de 325°C, perdendo peso continuamente sob a ação do calor. A lignina é o componente químico mais importante da madeira quando se objetiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico está diretamente relacionado ao conteúdo de lignina na madeira. Este componente começa a degradar-se em temperaturas mais baixas, cerca de 150°C, e ao contrário das celulosas e das hemiceluloses, a lignina continua perdendo peso em temperaturas superiores a 500°C, dando como resultado o carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 1982).

Além da composição química da madeira, são feitos estudos com relação à sua composição elementar. O principal elemento do carvão vegetal é o carbono, assim é importante saber a quantidade deste elemento na madeira, antes de sua conversão, para estudos de rendimento. De acordo com Gomide e Colodette (2007), a madeira é basicamente orgânica, em sua maior parte composta de carbono, hidrogênio e oxigênio. A fração de inorgânicos na madeira corresponde aos elementos minerais e representa uma pequena parte dos seus constituintes estando localizados principalmente na região da casca das árvores. Na Tabela 1 é apresentada a composição elementar da madeira de *Eucalyptus* spp.

**Tabela 1** – Análise elementar da madeira de *Eucalyptus* spp. em função da idade. (GOMIDE e COLODETTE, 2007)

<i>Eucalyptus</i> spp.	Análise Elementar da Madeira (%)			
	C	H	O	Inorgânicos
12 anos	48,3	5,8	45,2	0,52
9 anos	48,4	6,3	44,8	0,31
7 anos	48,4	5,8	45,1	0,41
5 anos	49,6	6,2	43,4	0,50

A carbonização da madeira compreende, de modo geral, quatro fases (CETEC, 1982, citado por OLIVEIRA, 1982): até 200°C, é caracterizada pela produção de gases condensáveis e não condensáveis, tais como vapor de água, CO<sub>2</sub>, ácido fórmico e

acético; entre 200°C e 280°C, são produzidos os mesmos gases da fase anterior, porém com redução substancial do vapor de água e com aparecimento de CO. As reações dessa fase são endotérmicas: de 280°C a 500°C, a carbonização ocorre por reações exotérmicas, e os produtos obtidos nesta etapa estão sujeitos a reações secundárias, incluindo combustíveis e alcatrão, CO e CH<sub>4</sub>; acima de 500°C, já se tem carvão vegetal, além de ocorrerem diversas reações secundárias, catalisadas pelo leito de carbonização.

A qualidade do produto final da carbonização, o carvão vegetal, depende de alguns fatores, como a qualidade da madeira a ser convertida, seu teor de umidade, que deve estar abaixo de 30%, e o controle do processo, envolvendo tempo e temperatura média máxima.

A carbonização em si é influenciada pelo teor de umidade da madeira, pelo tipo de forno, pelo posicionamento da madeira no seu interior e até mesmo por condições externas, como chuvas.

No que se refere à combustão de gases da carbonização, o entendimento de suas fases é imprescindível, a exemplo da etapa inicial do processo, em que ocorre grande quantidade de liberação de vapor de água, que dificulta a queima dos gases. Contudo, à medida que a temperatura de carbonização se eleva, reduz-se a liberação de vapor de água e aumenta a liberação de gases combustíveis de alto poder calorífico, como CO e metano, e a queima se torna mais eficiente.

### **3.2. Fornos para produção de carvão vegetal**

A produção de carvão vegetal esteve sempre associada com pobreza, falta de tecnologia, até mesmo com crimes ambientais e sociais, porém, atualmente essa visão vem sendo modificada pela adoção de novas tecnologias, cada vez mais sustentáveis, do ponto de vista econômico, social e ambiental.

O carvão vegetal é produzido por diversos tipos de fornos, desde aqueles mais rústicos até os mais modernos, com alta capacidade de enforamento e sistemas mecanizados de carregamento e descarregamento.

O método mais rústico de produção de carvão vegetal ocorre em trincheiras, sendo essa a maneira mais antiga de se produzir carvão. Esse método, apesar de extremamente barato, apresenta várias características indesejáveis, tais como: contaminação do carvão por terra, vulnerabilidade à chuva, rendimento baixo, em torno de 10 a 12%, carbonização longa, de 8 a 12 dias, além de o próprio processo de

carbonização ser difícil, pois a terra pode cair, fazendo com que haja combustão da madeira.

Para Ferreira (2000), o tipo de forno de alvenaria mais comum é o “rabo quente”, construído no formato de colméia, com orifícios de entrada de ar. Este forno apresenta rendimento gravimétrico médio de 20 a 28% e ciclo de carbonização de 5 a 7 dias. Vale ressaltar que este tipo de forno não apresenta nenhum sistema para minimizar a emissão de poluentes.

Em região onde o relevo é acentuado, o tipo de forno mais comum é o chamado “forno de encosta”, em que se aproveita o próprio “barranco” como parte constituinte do forno, reduzindo a quantidade de material utilizado. As principais vantagens desse tipo de forno é que são mais baratos e têm um bom rendimento, por volta de 30 a 32%, porém, seu resfriamento é lento, têm capacidade baixa de enforamento e ciclo de carbonização de 5 a 9 dias. Essas características desse tipo de forno são fáceis de serem entendidas, por exemplo, o rendimento é alto, pois a maior parte do forno está em contato direto com a terra, o que ocasiona poucas perdas térmicas para o ambiente, aumentando sua eficiência, porém, pelo mesmo motivo, seu resfriamento é lento, atrasando o processo. Nesse tipo de forno, o controle de entrada de ar é realizado pelas “baianas” e “tatus”. A ignição pode ser feita na porta ou na parte de cima do forno (BAER, 2008).

Outras variações dos fornos de superfície foram criados com o objetivo de aperfeiçoar a produção de carvão vegetal, modificando-se as entradas de ar, a posição e tamanho da chaminé para tiragem dos gases, a adaptação de câmara de combustão para ignição do forno sem queima da carga etc.

Atualmente o alvo de grandes investimentos por parte de grandes empresas do ramo de energia florestal são os fornos retangulares, que chegam a uma capacidade de 700st de madeira, além de suas operações de carregamento e descarregamento serem mecanizadas. Outra grande vantagem deste tipo de forno é permitir a recuperação ou queima dos gases gerados durante a carbonização. O tempo de residência da madeira dentro do forno é de 12 a 15 dias (RAAD, 2000).

Além dos fornos de alvenaria, hoje se busca a otimização do processo de conversão da madeira em carvão vegetal, utilizando fornos metálicos. No fim da década de 80, no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, na Universidade Federal de Viçosa, foi desenvolvido um protótipo de forno container. Neste sistema, o carvão é produzido em um cilindro metálico, e o controle da carbonização é feito por pirometria, tendo possibilidade de recuperação ou queima dos gases. Apresenta rendimento

gravimétrico médio de 35% e tempo de carbonização de 9 horas e 20 minutos (FERREIRA, 1988).

Outra tecnologia de fornos metálicos é o Dry-Pyrolysis-Carbonization (DPC), constituído de um sistema integrado em que a madeira passa pelos processos de secagem, carbonização e resfriamento. O princípio da DPC é a utilização dos gases emitidos, condensáveis e não condensáveis, como uma fonte da energia necessária ao processo de carbonização. As funções de secagem da madeira, carbonização e resfriamento do carvão vegetal se processam simultânea e independentemente em no mínimo três reatores. Os gases emitidos durante a pirólise, com um alto poder calorífico, são queimados em uma câmara de combustão, onde geram gases quentes, que são transportados para o reator no qual se processa a secagem da madeira (Dry-Pyrolysis-Carbonization - DPC).

### **3.3. Fornalhas para combustão dos gases da carbonização**

#### **3.3.1. Combustão**

Denomina-se combustão o conjunto de reações químicas exotérmicas nas quais os elementos combustíveis se combinam com o oxigênio, liberando energia quando o combustível atinge a temperatura de ignição. A temperatura de ignição pode ser definida como aquela na qual o calor gerado na reação é maior que o calor perdido para o ambiente, mantendo, assim, a combustão. Para a liberação máxima de energia térmica, é necessário converter os elementos oxidáveis – que reagem com o oxigênio – em substâncias ou compostos que não sejam mais oxidáveis (MELO, 2003; LOPES, 2002; SILVA, 1998).

No processo de carbonização, a combustão é parte integrante, visto que o acendimento de um forno necessita da combustão de um material para que haja liberação de calor e dê início ao processo, seja esse material parte da carga de madeira do próprio forno, ou resíduos quando o forno possui câmara de combustão. Além disso, quando se fala em queima dos gases da carbonização, também se refere à combustão desses gases, procedida numa fornalha.

Os gases da carbonização são substâncias combustíveis ricas em carbono e hidrogênio que, sob condições adequadas de temperatura e pressão, são capazes de, na presença de oxigênio, sofrer reações químicas, ocorrendo liberação de energia sob a

forma de luz e calor. Em uma queima completa, as emissões seriam constituídas apenas de CO<sub>2</sub> e vapor de água.

Para a liberação de toda a energia contida no combustível, através de uma queima completa, devem-se conhecer suas propriedades, sendo o poder calorífico e a sua constituição química as mais importantes. O poder calorífico se refere à energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume de um combustível. A composição química desses gases, com a fração molar de cada um dos seus constituintes, pode ser determinada por técnicas de cromatografia (BIZZO, 1992).

A combustão ideal, designada de combustão completa, ocorre quando todo carbono no combustível é oxidado para dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), todo hidrogênio para água (H<sub>2</sub>O) e todo o enxofre para dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) (CARVALHO JR. e MCQUAY, 2007).

As principais reações químicas que ocorrem devido à oxidação de um combustível, constituído essencialmente por carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Principais reações químicas envolvidas na oxidação dos elementos combustíveis C, H e S e entalpia da reação (Kj.Kg<sup>-1</sup>). (LOPES, 2002)

Reagentes		Produtos da reação	Entalpia da reação (Kj.Kg <sup>-1</sup> )
C + O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	- 33.613
C + ½ O <sub>2</sub>	→	CO	-10.004
CO + ½ O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	-23.609
2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	→	2 H <sub>2</sub> O (líquida)	-143.000
S + O <sub>2</sub>	→	SO <sub>2</sub>	-9259

Segundo Lopes (2002) e Melo (2003), as reações nas quais aparece monóxido de carbono nos produtos são ditas incompletas e trazem prejuízos quanto ao aproveitamento energético do combustível. Quando o carbono entra em combustão, com formação de CO, as reações deixam de liberar 23.609 Kj.Kg<sup>-1</sup> de carbono presente no combustível, o que equivale a aproximadamente 70% do seu efeito térmico.

De acordo com Lopes (2002), todo o processo de combustão deve atender a princípios fundamentais que assegurem economia ou eficiência na queima do combustível. Para isto, é necessário controlar os fatores que interferem na qualidade da combustão e assegurar a presença de três elementos que compõem o chamado “triângulo da combustão”: temperatura, combustível e oxigênio. É imperativo que estes

fatores se combinem na dosagem certa e no tempo correto para promover uma combustão completa e eficiente. Para uma boa combustão, três condições devem ser observadas:

- Temperatura igual ou superior à temperatura de ignição. A câmara de combustão deve propiciar condições adequadas para que o combustível atinja a temperatura de ignição e para que a combustão seja autossustentada (quando o calor gerado nas reações de oxidação é superior às perdas no processo).
- Mistura ou turbulência adequada do ar com o combustível. É necessário que o comburente e o combustível sejam colocados em contato íntimo.
- Tempo e espaço suficientes para que ocorra a reação de combustão.

A combustão da biomassa ocorre pela degradação que o material sofre pelo calor, sendo dividida em algumas fases, como secagem do material, pirólise e ignição dos gases gerados na pirólise.

Portanto, alguns parâmetros da combustão são estudados com objetivo de definir condições ideais para que haja melhor eficiência do processo.

Segundo Magalhães (2007), ar estequiométrico é definido como a quantidade mínima de ar necessária para reagir quimicamente com o combustível no processo de combustão, garantindo sua queima. A quantidade exata de ar é calculada então em função do combustível que será utilizado.

Para garantir a queima completa do combustível, é necessária uma quantidade de ar maior do que a calculada, chamado de “excesso de ar”. Segundo Vlassov (2001), é importante o excesso de ar, visto que o ar teórico calculado em alguns casos permitirá a queima do combustível com excesso de ar, em outros, com sua falta.

Além disso, no caso da queima de gases da carbonização, outro fator importante é a temperatura do gás liberado no forno de carbonização durante o processo, visto que, para que ocorra sua combustão com eficiência e a chama permaneça dentro da câmara de combustão, é preciso que este gás atinja a temperatura de ignição.

### **3.3.2. Fornalhas**

Fornalhas são dispositivos projetados para assegurar a queima completa do combustível, de modo eficiente e contínuo, visando ao aproveitamento de sua energia térmica liberada da combustão, com o maior rendimento térmico possível.

O projeto de uma fornalha deve ser baseado nos três princípios da combustão - temperatura, turbulência e tempo - para propiciar uma mistura ar-combustível homogênea, na dosagem ideal e no tempo correto, e permitir o aquecimento do combustível até a sua ignição autossustentável e combustão completa (LOPES, 2002; MELO, 2003).

Segundo Silva (1998), fornalhas são compostas por uma câmara de combustão, onde os combustíveis são completamente oxidados; por uma grelha, onde se apóia o combustível sólido; por aberturas de entrada e saída, destinadas ao carregamento do combustível sólido e as passagens do ar ambiente e do ar da secagem; e por um cinzeiro, onde são depositados os resíduos da combustão. Porém, vale ressaltar que no caso de combustível gasoso não há grelha nem cinzeiro, apenas uma câmara de combustão, onde os gases são queimados, e as entradas de ar.

Uma fornalha projetada de forma otimizada deve apresentar dimensões mínimas, mas suficientes para uma combustão eficiente e com o mínimo de excesso de ar. Volumes pequenos podem implicar combustão parcial, com presença de material ainda combustível nos gases que deixam a fornalha (incombustos). Por outro lado, volumes grandes, por apresentarem maior superfície de irradiação, podem implicar menor temperatura na câmara de combustão, podendo dificultar o processo de ignição das partículas do combustível (LOPES, 2002).

Para a construção de uma fornalha para queima de gases, como não há grelha e cinzeiro, a preocupação deve ser dimensionar corretamente a câmara de combustão, atendendo à vazão do gás que será queimado.

### **3.3.3. Dimensionamento de fornalhas**

O dimensionamento de fornalhas deve ser feito levando-se em consideração o tipo de combustível que será utilizado, de modo que permita sua combustão completa.

Deve ser projetada de modo a tornar prática e fácil a entrada do combustível e do ar comburente, permitindo também o controle da quantidade de cada um deles.

Segundo Magalhães (2007), os principais parâmetros a serem observados quando do dimensionamento de fornalhas são: o volume da câmara de combustão, a área superficial da grelha, a área livre da grelha e as aberturas para entrada de ar.

No caso de uma fornalha para queima de gases da carbonização, como o combustível não é material sólido, não é necessário grelha, o que reduz bastante o custo da fornalha.

O volume da câmara de combustão é um dos requisitos mais importantes quando se fala em fornalhas para queima de gases da carbonização, pois ela deve comportar todo o gás gerado no processo de carbonização, que deve ser totalmente oxidado no processo de combustão. Outro parâmetro importante é o fluxo dos gases, que pode ser controlado na saída de tiragem do forno de carbonização por meio de um registro, amenizando possíveis erros no dimensionamento da fornalha, por exemplo, se a fornalha foi pequena para o volume de gases gerados no processo de carbonização, pode-se diminuir o fluxo de sua entrada na fornalha, para que os gases possam ser queimados completamente na câmara de combustão.

Segundo Mello (2003), um parâmetro importante no dimensionamento de fornalhas é a carga térmica volumétrica, que define o volume da câmara de combustão em função da energia liberada. Este parâmetro não pode ser calculado por meio teórico, ele tem sido determinado com base em estudos de caso em fornalhas já existentes.

Portanto, o volume da câmara de combustão da fornalha está diretamente ligado ao tamanho do forno e à velocidade de carbonização da madeira.

Para se obter uma queima satisfatória, é necessário conhecer não somente a temperatura de combustão, mas também o tempo de oxidação. A câmara de combustão deve então ser projetada para permitir ainda uma velocidade de propagação dos gases no seu interior, tendo um tempo mínimo de residência para que ocorra a queima completa (FERREIRA, 2004).

### **3.4. Materiais isolantes**

Com o objetivo de aumentar a eficiência de queima em fornalhas, têm sido empregados alguns materiais isolantes para evitar, ou reduzir, as perdas de calor. Alguns dos principais materiais são tijolos refratários, argamassa refratária e manta cerâmica. O tijolo refratário e a argamassa refratária têm a vantagem de aumentar a durabilidade das fornalhas. O refratário é um tipo especial de tijolo cozido, feito com argila enriquecida de materiais que diminuem a retração mecânica quando exposto ao forte calor e funciona como isolantes térmicos.

A manta cerâmica é material apenas isolante, devendo ser aplicada no interior da fornalha, onde terá contato direto com o calor. Além de isolar termicamente, ela ajuda a proteger os tijolos ou outro material de construção do qual a fornalha e até mesmo a chaminé foram feitos, aumentando, além de sua eficiência, também sua durabilidade.

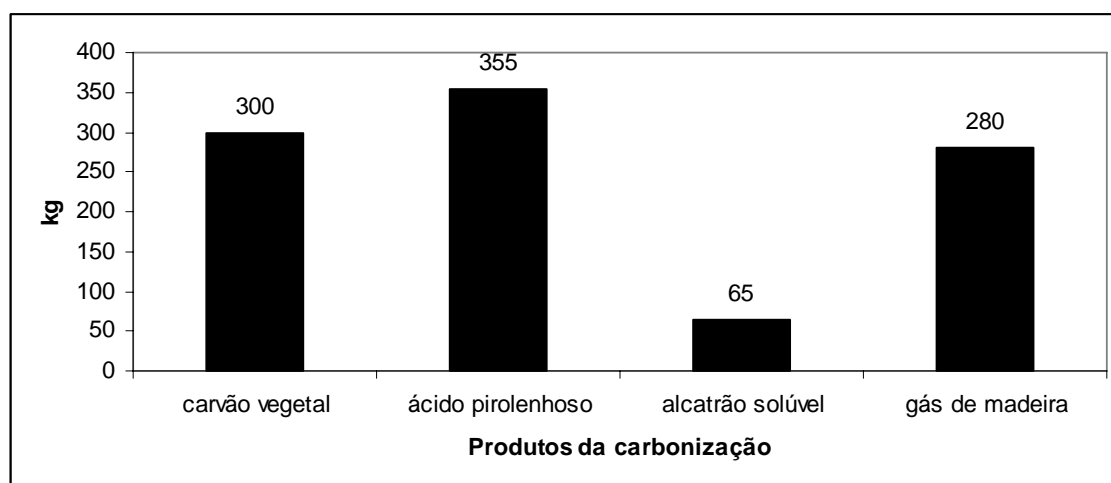


As mantas cerâmicas são constituídas em sua maioria de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  (NUTECIBAR, 2007).

### 3.5. Aspectos ambientais da produção de carvão vegetal

Os poluentes contidos nos gases da carbonização podem ser classificados em três categorias: pós e partículas em suspensão, gases não condensáveis e compostos orgânicos condensáveis (MEZERETTE e GIRARD, 1996). Segundo Pimenta et al. (2004), vários subprodutos podem ser obtidos da carbonização da madeira via condensação dos gases ou mesmo promover a queima integral das emissões, e com isso reduzir ou eliminar a liberação de compostos poluentes para a atmosfera. Os produtos finais deste processo sob condições controladas são ácido pirolenhoso, alcatrão, gases não-condensáveis e carvão.

A Figura 1 apresenta o rendimento gravimétrico da carbonização de 1 tonelada de madeira, base seca.



**Figura 1** - Rendimentos gravimétricos da carbonização. (Adaptado de CONDE, 2006).

De acordo com Pimenta et al. (2004), os gases gerados no processo de carbonização contêm vários compostos poluentes, sendo que os principais são os compostos orgânicos condensáveis e os gases não condensáveis. Os gases não condensáveis são compostos principalmente de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CH}_4$ . O  $\text{CO}_2$  representa 58% em volume dos gases não condensáveis, sendo o principal gás da carbonização por ser produzido em grandes volumes.

Segundo o Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (1994), a queima dos combustíveis de biomassa é uma das principais

fontes emissoras de CH<sub>4</sub>, sendo a lenha, o carvão vegetal e o bagaço as principais fontes de emissão na geração de energia. O carvoejamento da madeira e a utilização final do carvão produzido, como um insumo energético nos altos-fornos das siderúrgicas, corresponderam a principal fonte de emissão de CH<sub>4</sub> por queima de combustíveis no ano de 1994, ficando com cerca de 60% das emissões: 48% no processo de carvoejamento e 11% durante a queima do carvão nos altos-fornos das siderúrgicas.

Para Bahr et al. (2006), como consequência da liberação de CH<sub>4</sub>, o teor de metano atmosférico aumentou mais do que o seu dobro desde o início da industrialização. A quantidade anual emitida mundialmente, segundo estudos do IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* – publicados em 1996, calculado entre os anos 1980 até 1990, foi de 375 milhões de toneladas. Isto implica uma porcentagem de efeito estufa antropogênico de aproximadamente 20%.

Os compostos orgânicos condensáveis ou COC, por sua vez são os principais compostos poluentes presentes nos gases da carbonização. Durante o processo de carbonização, ocorre a decomposição térmica da madeira, e parte dos gases provenientes do leito de reação pode ser condensado e, com isso, obtém-se o licor pirolenhoso. Este licor, por decantação, é separado em duas fases: uma aquosa, contendo alcoóis, cetonas e vários compostos voláteis de baixo peso molecular; e outra fase viscosa, chamada alcatrão vegetal, composta de água, fenóis voláteis (creosoto de madeira) e piche (CASTRO, 1982).

Os COC são formados por compostos orgânicos agrupados em classes químicas variadas. A natureza química dos COC tem sido objeto de vários estudos, porque o conhecimento das suas propriedades é de grande importância para o desenvolvimento de sistemas com a finalidade de eliminar ou reduzir, de maneira eficiente, emissões de poluentes durante o processo de carbonização. Já foram identificados mais de 600 compostos presentes nos COC e, dentre estes compostos, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos apresentam potencial de causar impactos ao ambiente, em função de suas propriedades mutagênicas e carcinogênicas. Estes compostos estão estreitamente associados com o alcatrão vegetal, tanto na forma de alcatrão insolúvel como na forma de alcatrão solúvel presente no ácido pirolenhoso (PIMENTA et al., 2004).

No processo convencional de produção de carvão vegetal, em média, apenas 30% da madeira é convertida em carvão, os outros 70% da massa da madeira se tornam gases. No caso do Brasil, onde em 2008 foram consumidos 34 milhões de m<sup>3</sup> de carvão (AMS, 2009), tendo uma densidade média do carvão de 250 kg/m<sup>3</sup>, tem-se uma massa

de 8,5 bilhões de quilos de carvão. Considerando que isto represente 30% de toda a madeira gasta na produção, obtém-se uma quantidade de madeira correspondente a 28,33 milhões de toneladas gastos para a produção. Considerando que toda produção desse carvão não envolve tecnologia de recuperação ou queima de gases, conclui-se que cerca de 19,83 milhões de toneladas de gases foram despejados no meio ambiente, somente no ano de 2008.

Neste contexto, o aproveitamento dos gases da carbonização é fundamental para produção de carvão vegetal sustentável, de maneira menos nociva ao meio ambiente. No Brasil, o carvão vegetal é essencialmente produzido em sistemas rudimentares de carbonização, e as alternativas para redução da poluição tornam-se inviáveis porque implicariam aumento do custo de produção. Porém, diversos sistemas de redução e controle da poluição são estudados e utilizados para resolver os problemas causados pelas emissões de poluentes e para recuperar os gases produzidos. Uma possibilidade seria a recuperação dos gases e a sua incineração em um queimador, produzindo energia que poderia ser utilizada na secagem da lenha previamente à carbonização, melhorando o rendimento do processo (PIMENTA et al., 2004). A energia liberada também pode ser utilizada na secagem de grãos, aquecimento de aviários e, até mesmo, na geração de energia elétrica. De modo geral, pode-se reduzir o efeito negativo dos gases da carbonização por meio de duas alternativas: recuperando os gases condensáveis através de condensadores ou queimando os gases combustíveis em câmara de combustão.

Algumas tecnologias de produção de carvão permitem a utilização de recuperadores de gases, porém, atualmente tem se buscado mais a segunda alternativa, devido à dificuldade de comercialização do alcatrão e do licor pirolenhoso.

A queima dos gases da carbonização permite novas oportunidades de aproveitamento de energia, pois, além de não poluir o ambiente, este processo libera energia na forma de calor, que pode ser utilizada de diversas formas.

### **3.5.1. Mercado de créditos de carbono**

Segundo Rocha (2003), a partir do Protocolo de Quioto, ficou claro que o mercado poderia auxiliar na redução dos Gases de Efeito Estufa (GEEs) pela proposta de se criar um valor transacionável para essas reduções. Dentro deste princípio, foram estabelecidos mecanismos de flexibilização, dentre eles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), propondo que cada tonelada de CO<sub>2</sub> deixada de ser emitida, ou é retirada da atmosfera por um país em desenvolvimento, ou poderá ser

negociada no mercado mundial, criando um novo atrativo para redução das emissões globais. Assim, as empresas que não reduzirem suas emissões podem comprar Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) nos países em desenvolvimento para atingir suas obrigações com relação ao Protocolo de Quioto.

Em 2008, o mercado global de carbono foi de cerca de 92 bilhões de euros, contra 40 bilhões em 2007, isso devido ao aumento do preço médio dos créditos de carbono (TVINNEREIM et al., 2009).

Os dados econômicos mostram a importância do mercado de créditos de carbono, contudo, no processo de carbonização, as emissões de CO<sub>2</sub> não são contabilizadas devido à utilização de biomassa de fonte renovável plantada com esta finalidade, que possui a característica de fixar carbono durante o seu desenvolvimento, podendo gerar créditos de carbono em projetos de MDL. As emissões de CH<sub>4</sub> correspondem então ao principal gás do efeito estufa liberado na carbonização, além disso, o metano é mais nocivo ao meio ambiente que o CO<sub>2</sub>, estimando-se que uma tonelada deste gás seja equivalente a 21 toneladas de monóxido de carbono (BAHR et al., 2006).

A redução nas emissões de GEE deve ser adicional a quaisquer outras que ocorreriam na ausência da atividade de projeto, ou seja, uma atividade de projeto de MDL é adicional se as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa por fonte forem reduzidas abaixo das que ocorreriam na ausência da atividade de projeto de MDL registrado (BRINKS et al., 2007).

Assim, a redução da emissão de metano no processo de carbonização da madeira torna-se o principal meio de adicionalidade desta atividade no mercado de créditos de carbono.

Atualmente, empresas de carbonização já buscam sua inclusão em projeto de MDL, baseando-se na redução de emissões de metano. Um exemplo é a Empresa Plantar, que, por meio de melhorias no processo de carbonização, visando a aumentar o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, obteve redução de emissões, criando novas perspectivas. De acordo com a Empresa Plantar (2006), espera-se que o registro do projeto de redução de metano na carbonização como uma atividade de MDL estimule outros produtores de carvão vegetal a adotar tecnologias aperfeiçoadas, conscientizando-os sobre as prováveis melhorias no processo de carbonização e suas emissões. Espera-se também que o incentivo do MDL alivie as barreiras financeiras e que o exemplo do projeto encoraje atores do mercado a participar no desenvolvimento e na disseminação desta tecnologia.

Portanto, sob esse aspecto, mostra-se vantajosa a aplicação de tecnologia de queima de gases da carbonização, pois, além de melhorias no próprio processo, criando a possibilidade de fonte alternativa de energia, pode ser economicamente viável pela inclusão no mercado de créditos de carbono.

### **3.6. Qualidade do carvão vegetal**

A qualidade do carvão vegetal está diretamente associada à madeira e ao processo, sendo este último de grande importância quando se faz a queima dos gases da carbonização numa fornalha, pois, apesar de ainda não se terem dados na literatura a respeito, na prática vem sendo relatado por pesquisadores que a queima de gases por fornalhas eleva a taxa de carbonização, necessitando de um maior controle da entrada de oxigênio e da tiragem dos gases.

Portanto, se esse controle não for possível, a carbonização será ineficaz, com presença de tiços e finos, além de produzir um carvão vegetal de qualidade não adequada.

Assim, faz-se necessário determinar as propriedades do carvão vegetal para avaliar esse efeito. Abaixo, segue uma pequena revisão das propriedades do carvão vegetal.

#### **3.6.1. Propriedades do carvão vegetal**

##### **Análise química imediata**

Do ponto de vista da análise química imediata, o carvão vegetal se compõe de três frações distintas: carbono fixo (CF), matérias voláteis (MV) e cinzas (CZ).

##### **Carbono Fixo**

O carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente no carvão. O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira e inversamente proporcional ao teor de holocelulose. O teor de carbono fixo é inversamente proporcional ao rendimento gravimétrico em carvão vegetal, já o rendimento em carbono fixo é uma função direta do rendimento gravimétrico e do teor de carbono fixo presente no carvão vegetal (OLIVEIRA, 1988).

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

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

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

### **Cinzas**

A cinza é um resíduo mineral proveniente dos componentes minerais do lenho e da casca (COTTA, 1996, citando VITAL et al., 1986).

Geralmente, o carvão vegetal apresenta menor teor de cinzas quando comparado com o coque mineral (CARMO, 1988).

Altos teores de cinzas, bem como os sais presentes na sua composição, podem prejudicar a produção de ferro-gusa, ferros-liga e metais não ferrosos, podendo provocar, no caso do ferro-gusa, o fenômeno da “segregação” (BARCELLOS, 2007).

Segundo Cotta (1996), citando Collet (1955), o carvão produzido para fins siderúrgicos deve ter uma menor proporção de minerais, pois quanto maior sua proporção na madeira, maior a produção de cinzas no carvão. O fósforo e o enxofre são constituintes da madeira que, em determinadas proporções, acabam por serem fixados no carvão, em quantidades inaceitáveis.

Segundo Colpaert (1974), altos teores de elementos minerais no carvão vegetal, entre eles o fósforo e o enxofre, podem provocar a segregação, que consiste no acúmulo de impurezas, que, na impossibilidade de se deslocarem no metal solidificado, vão sendo repelidas para o centro das peças, visto a solidificação ocorrer da periferia para o centro. Isto acarreta variações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos produtos, tornando-os duros e quebradiços, menos maleáveis e com campos favoráveis à propagação de fissuras.

### **Materiais Voláteis**

Os materiais voláteis podem ser definidos como as substâncias desprendidas da madeira, como os gases, durante a carbonização e/ou queima do carvão.

Os fatores que influenciam os materiais voláteis no carvão são a temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da madeira (CARMO, 1988). A temperatura é o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão.

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

Botrel et al. (2007), estudando 9 clones de *Eucalyptus* spp., obtiveram os seguintes valores para análise química imediata, para um carvão produzido numa carbonização com temperatura máxima de 450°C: teor de materiais voláteis, de 22,86 a 27,98%; teor de cinzas, de 0,16 a 0,32%; e teor de carbono fixo, de 71,74 a 76,93%.

Barcellos (2007) obteve os seguintes valores médios para carvão de *Eucalyptus* spp.: teor de materiais voláteis, de 29,39%; teor de cinzas, de 1,15%; e teor de carbono fixo, de 69,44%.

### **Densidade**

No carvão vegetal a densidade é uma propriedade importante, pois determina o volume ocupado pelo termorreduzidor nos fornos de redução e gaseificação. Como o carvão vegetal é um material bastante poroso, com 70-80% de porosidade, a densidade varia conforme a técnica de determinação.

A densidade relativa aparente do carvão é influenciada pelas suas características de granulometria e presença de trincas, sendo uma característica muito importante na qualidade do carvão, pois afetará suas demais propriedades (MENDES et al., 1982).

É relevante ressaltar que a densidade básica da madeira está diretamente relacionada com a densidade do carvão, e segundo Brito e Barrichelo (1980), o coeficiente de correlação entre as densidades da madeira e do carvão é de 97,32%, significativo a 1% de probabilidade, para espécies do gênero *Eucalyptus*. Brito (1983) obteve um valor de 0,335 g/cm<sup>3</sup> de densidade aparente para o carvão de *Eucalyptus grandis*.

Barcellos (2007) obteve os seguintes valores de densidade aparente para os carvões de *Eucalyptus urophylla* (0,49g/cm<sup>3</sup>), *Eucalyptus cloeziana* (0,43g/cm<sup>3</sup>) e 0,39g/cm<sup>3</sup> para um clone de *Eucalyptus urophylla*.

## **Resistência Mecânica**

A resistência mecânica do carvão é de grande relevância, devido às numerosas operações de manuseio e transporte que o produto sofre durante seu trajeto dos fornos de carbonização até os altos-fornos.

A baixa resistência mecânica do carvão é um problema que traz prejuízos em diversas etapas da produção do ferro-gusa. As perdas vão desde a produção do insumo carvão vegetal até o processo de produção do ferro-gusa propriamente dito. Quanto menor a resistência mecânica do carvão, maior a produção de finos. Esse fato faz com que haja menor rendimento na carbonização quando são feitos os descarregamentos da madeira carbonizada do interior dos fornos de carbonização, além de problemas no transporte, que aumentam ainda mais a produção de finos (VIEIRA et al., 2008).

A friabilidade é a propriedade do carvão vegetal relacionada à susceptibilidade do produto em formar finos quando submetido à abrasão e choques mecânicos.

Está relacionada com a umidade, o diâmetro e o comprimento da madeira a ser carbonizada. Normalmente, teores altos de umidade estão associados a altas velocidades de expansão de gases durante a carbonização, o que provoca rupturas generalizadas na estrutura do carvão resultante, aumentando sua friabilidade. Grandes diâmetros na madeira a ser carbonizada também tendem a gerar carvões mais quebradiços.

Já é conhecida a influência do diâmetro da madeira na susceptibilidade de formação de trincas durante a carbonização. As trincas e fissuras internas do carvão constituem zonas de concentração de tensão e, segundo Tarkov (1978), citado por Mendes et al. (1982), a fonte de tais concentrações de tensão pode ser atribuída à grande impermeabilidade da região central (cerne) das peças de madeira.

Segundo Coutinho e Ferraz (1988), a friabilidade do carvão vegetal está diretamente relacionada ao diâmetro da madeira e à temperatura final de carbonização. Árvores com diâmetros maiores têm maior área de cerne, estando mais propícias à formação de trincas e fissuras durante a carbonização, ocasionando maior geração de finos. Também foi concluído que quanto mais elevada for a temperatura final de carbonização, maior a geração de finos do carvão vegetal produzido.

## **Umidade ou Higroscopicidade**

A umidade contida no carvão vegetal exerce uma grande influência no rendimento dos processos em que ele é utilizado. O carvão absorve umidade da atmosfera, principalmente durante as chuvas, perdendo-a parcialmente com sua exposição ao sol (OLIVEIRA, 1982).



Segundo Santos (2008), o teor de umidade ideal do carvão, quando da sua utilização para siderurgia, está entre 0 e 6%.

### **Poder calorífico superior**

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calor liberada na combustão completa de uma unidade de massa de carvão vegetal, expressa em kcal/kg para combustíveis sólidos e líquidos e kcal/m<sup>3</sup> para combustíveis gasosos.

Esta propriedade é de grande importância, principalmente quando se pensa na utilização do carvão vegetal como fonte de energia em substituição aos combustíveis derivados do petróleo. O poder calorífico pode ser determinado teoricamente pela composição química elementar do carvão ou, experimentalmente, em uma bomba calorimétrica.

Barcellos (2007) obteve um valor de 7418,81 kcal/kg para carvão de *Eucalyptus* spp. e de 7454,25 kcal/kg para um clone de *Eucalyptus urophylla*.

Arantes et al. (2008) obtiveram valores de poder calorífico para *Eucalyptus saligna*, *E. cloeziana*, *E. grandis*, *E. urophylla* e *E. camaldulensis* de 7118, 7687, 7394, 7112 e 7835 kcal/kg, respectivamente.

Como pode ser observado, os valores de poder calorífico superior para carvões de madeira de eucalipto estão compreendidos entre 7000 e 8000 kcal/kg.

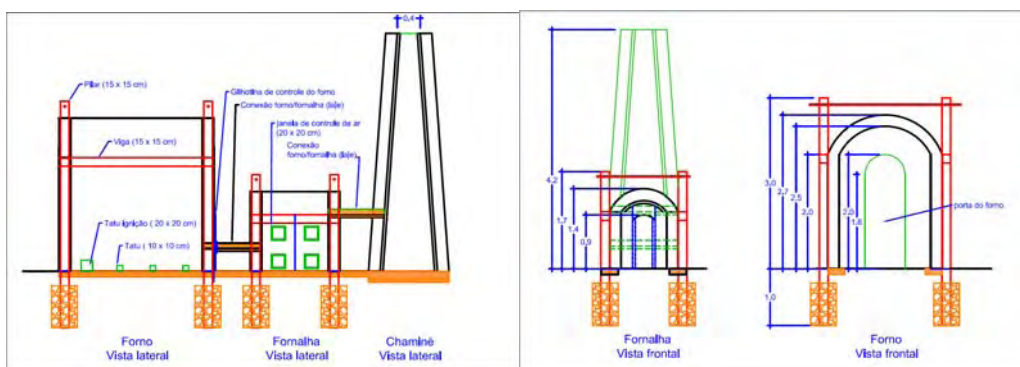
## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Local**

O trabalho foi realizado no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, situada no município de Viçosa, Minas Gerais.

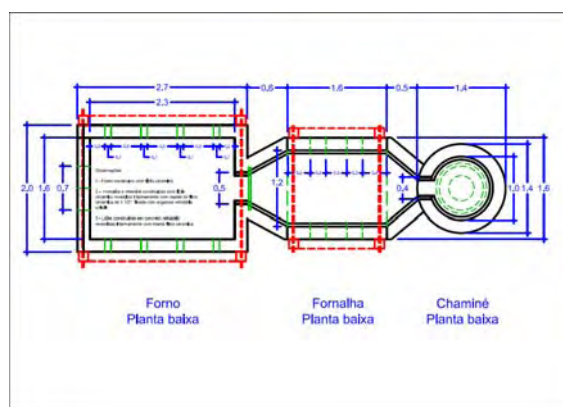
### **4.2. Projeto e construção do forno e fornalha para combustão dos gases da carbonização.**

O projeto foi dimensionado pela empresa ArcelorMittal Bioenergia, situada em Martinho Campos-MG. O sistema de forno-fornalha foi projetado para a carbonização de 10,4 estéreos de madeira, tendo a possibilidade de carbonização da madeira tanto na vertical quanto na horizontal. A construção seguiu os parâmetros apresentados na Figura 3, buscando-se projetar um forno com fornalha para combustão de gases com as mesmas características dos fornos retangulares industriais da empresa ArcelorMiittal, instalados na Unidade de Produção de Carvão Buritis, porém, em escala piloto, ou seja, não foi feito nenhum cálculo de dimensionamento, apenas foi reduzida a escala dos fornos industriais.



(a)

(b)



(c)

**Figura 2** – (a) Vista lateral do forno com fornalha; (b) Vista frontal do forno e da fornalha; e (c) Planta baixa do forno com fornalha.

Antes do início da construção do forno e da fornalha, foi feito o nivelamento do solo na área destinada à construção.

A construção foi iniciada com a marcação do terreno para a fundação, feita com concreto armado e pedra de mão (Figura 3).

Após a fundação, foi feita a construção das paredes do forno, da fornalha e da chaminé, em paredes de 20 centímetros de largura, com tijolos maciços (Figura 4 (a)). Para o assentamento dos tijolos, utilizou-se argamassa contendo terra, areia, cola branca (PVA) e açúcar, com o objetivo de suportar o calor durante as carbonizações, evitando-se trincas e rachaduras.

Conforme se pode observar na Figura 6, nas paredes do forno e da fornalha foram feitas as aberturas para controle da entrada de ar.

Com o término das paredes, foram produzidos os pilares e vigas de sustentação, com concreto armado.

Para a construção das copas do forno e da fornalha, primeiramente foi confeccionado um gabarito de compensado (Figura 4 (b)) acompanhando o formato arredondado da copa sustentado por toras de madeira, para posterior construção da copa. Apoiadas no gabarito, as copas foram construídas com espessura de 20 cm, com tijolos em formato de cunha.

A fornalha e a chaminé receberam no interior de suas paredes revestimento de manta cerâmica, que foi aderida com argamassa refratária. O forno não recebeu nenhum acabamento interno nas paredes, o piso foi feito de tijolo maciço.

A manta cerâmica utilizada foi a NAUTECIBAR HT, constituída de  $Al_2O_3$  (52 a 54%),  $SiO_2$  (44 a 48%),  $Fe_2O_3$  (0,1 a 0,2%),  $TiO_2$  (0,1 a 0,2%). As propriedades da manta são: limite máximo de uso a  $1482^\circ C$ , limite contínuo de uso a  $1380^\circ C$ , ponto de fusão a  $1760^\circ C$ , diâmetro da fibra de  $2,5\mu$ , comprimento da fibra 178 mm e contração linear de 2,0% a  $1300^\circ C$  por 24 horas (NUTECIBAR, 2007).

A parte externa do forno, da fornalha e da chaminé foi revestida com argamassa composta de terra e areia.

Com o objetivo de conferir maior resistência ao forno e à fornalha, devido às grandes pressões que eles devem suportar, foram produzidas vigas transversais unindo os pilares laterais, conforme Figura 5 (b).

Para unir o forno à fornalha, foi construída uma conexão (Figura 7 (b)) com tijolos maciços na espessura de 20 cm. Na parte superior (teto), foi feita uma laje, e todo seu interior também foi revestido de manta cerâmica.

O forno foi construído com 4 aberturas laterais para ignição e controle da carbonização. Entre o forno e a fornalha, foi colocada uma guilhotina para controle da saída de gases, feita de chapa de ferro com 55 x 50 cm e 3 mm de espessura.



(a)



(b)

**Figura 3** – (a) Esquadrejamento do terreno para confecção da fundação; (b) Confecção da fundação do forno.



(a)



(b)

**Figura 4** – (a) Formação das paredes do forno; (b) Gabarito de compensado para confecção da copa do forno.



(a)



(b)

**Figura 5** – (a) Vista superior da chaminé mostrando a aplicação de manta cerâmica; (b) Colocação das vigas transversais no forno (parte superior da figura) e na fornalha.



(a)



(b)

**Figura 6** – (a) Detalhe das aberturas da fornalha (queimador), podendo observar a manta cerâmica no seu interior; (b) Detalhe das aberturas laterais do forno (“tatu” de ignição maior).





(a)



(b)

**Figura 7** – (a) Detalhe do interior do forno mostrando a abertura para saída de gases e a guilhotina; (b) Detalhe da conexão entre o forno e a fornalha, mostrando também a guilhotina.



**Figura 8** – Vista geral do projeto.

### **4.3. Madeiras utilizadas para carbonização**

Nos testes preliminares para verificar o funcionamento da fornalha, utilizou-se madeira de café, proveniente de reforma de plantio, com diâmetro e comprimento médio de 7 cm e 1,20 m, respectivamente.

Após a validação do funcionamento do forno e da fornalha, para as demais carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., com idade de 8 anos, com comprimento de 2,10 m e diâmetro variando de 12 a 20 cm, provenientes de plantios da empresa Plantar, situados no município de Felixlândia MG.

#### **4.3.1. Caracterização das madeiras**

Foi determinada densidade básica da madeira segundo método descrito por Vital (1984).

Para determinação da composição química da madeira, as amostras de madeira foram transformadas em serragem utilizando um moinho de laboratório tipo Wiley, de acordo com a norma 257 om-52. Foi utilizada a fração que atravessou a peneira nº 16 internacional (malha 40 ASTM), retida na peneira nº 24 internacional (malha 60 ASTM). A determinação do teor absolutamente seco foi feita conforme a norma TAPPI 264 0m-88.

Os teores de extrativos na madeira foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 264 om-88, apenas alterando o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno, por ser aquele perigoso para os seres humanos.

A lignina insolúvel foi determinada em duplicata pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986), derivado da norma TAPPI T 222 om-88. A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), e foi considerado teor de lignina a soma dos dois valores.

O teor de Holoceluloses foi obtido pelo somatório dos teores de Extrativos e Lignina totais, decrescido de 100.

Também foi determinado o poder calorífico das madeiras utilizadas, pela norma NBR 8633.

### **4.4. Carbonização da madeira**

#### **4.4.1. Carregamento do forno**

O enchimento do forno foi feito manualmente. Para cada carbonização, foram retiradas amostras de cinco toras, 3 discos por tora, nas extremidades e na medida média, para determinação de teor de umidade. Toda a madeira enforada foi pesada,

para posterior cálculo de rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em base seca. A madeira foi colocada no forno na posição vertical e na parte superior do forno, onde a madeira não preencheu o espaço, foram colocadas peças menores e tiços para melhor aproveitamento do espaço interno.

Após o carregamento do forno, procedeu-se ao fechamento da porta, utilizando-se argamassa de terra, areia, água e tijolos maciços.

#### **4.4.2. Ignição e controle de carbonização**

Para o acendimento do forno, utilizou-se um maçarico, com o qual foi dada ignição em ambos os “tatus” de ignição, um de cada lado do forno.

O controle de carbonização foi feito pela medição de temperatura, controle de entradas de ar e controle de saída de ar pela guilhotina.

O controle das entradas de ar foi feito baseando-se na temperatura na parte superior do forno, tendo como meta a temperatura final de carbonização não superior a 500°C, e esse controle se deu à medida que a temperatura no topo do forno se elevava, procedendo-se ao fechamento parcial das entradas de ar, até o fechamento total no final da carbonização.

A temperatura foi medida por três termopares: dois fixados na parte superior do forno, um próximo à porta e outro na extremidade oposta, e o terceiro fixado na conexão entre o forno e a fornalha, com objetivo de medir a temperatura de saída dos gases para a fornalha.

#### **4.4.3. Combustão dos gases na fornalha**

A combustão dos gases na fornalha foi iniciada logo após a ignição do forno, com auxílio de um maçarico e mantida com resíduos lignocelulósicos até atingir a temperatura de  $\pm 120^{\circ}\text{C}$ , quando os gases permaneciam em combustão sem a necessidade de alimentação com resíduos. Deste momento até o fim da carbonização, quando ocorre diminuição no volume de gases liberados, a chama dentro da câmara de combustão da fornalha permaneceu acesa.

Apenas as duas aberturas, superior e inferior, próximas à chaminé, foram mantidas abertas para alimentação com resíduos e ignição com maçarico.



#### **4.4.4. Fechamento e resfriamento do forno**

O fechamento foi efetuado no momento em que a temperatura dentro do forno começou a diminuir, observando-se também, de dois modos, os gases liberados na chaminé, quando se utilizou a fornalha para combustão dos gases, e outro quando os gases não foram queimados. No primeiro caso, o fechamento do forno se deu quando a fornalha se apagava e a chaminé começava a liberar um volume pequeno de gases; no segundo caso, o forno foi fechado quando os gases que saíam da chaminé passavam da cor azulada para incolor e quando saíam em pouca quantidade. Neste instante, todas as entradas de ar, inclusive a guilhotina, foram vedadas com argamassa de terra e água. Posteriormente, foi feito o procedimento conhecido como “barrela”, ou seja, uma massa contendo terra e água, de baixa consistência, aplicada a todas as possíveis entradas de ar, ocasionadas por trincas, objetivando a restrição de ar para dentro do forno, de modo a cessar a carbonização.

O processo de resfriamento do forno ocorreu de modo natural, ou seja, após a “barrela” não se utilizou nenhum procedimento para acelerar o resfriamento. A temperatura durante parte do resfriamento foi monitorada por termopares.

#### **4.4.5. Abertura e descarga do carvão**

Após o resfriamento do forno, procedeu-se à abertura da porta para o descarregamento do carvão, feito com garfo metálico apropriado e colocado em sacos de aproximadamente 50 litros para posterior pesagem, feita com a mesma balança utilizada para pesar a madeira. Durante a retirada do carvão, os finos foram separados pelo próprio garfo e depois ensacados e pesados. Os “ticos”, madeira parcialmente carbonizada, foram pesados e posteriormente utilizados em outras carbonizações.

#### **4.5. Amostragem do carvão para análises físicas e químicas**

Após a pesagem do carvão, para proceder às análises físicas e químicas, foram sorteados seis sacos, os quais foram colocados em uma lona, homogeneizados e quarteados, e de um quarto retirou-se uma alíquota de 20 litros, baseando-se na norma NBR 6923 da ABNT.

#### 4.6. Rendimento gravimétrico da carbonização

A determinação do rendimento em carvão, finos e tiço, foi feita pela sua análise gravimétrica, ou seja, pesagem de todo material. Primeiramente, a madeira colocada dentro do forno para carbonização foi pesada e retiradas amostras para determinação do teor de umidade, para obtenção da massa seca de madeira enforada. Depois da carbonização, obtiveram-se as massas do carvão, dos finos e de tiço, e calculou-se o rendimento gravimétrico pelas seguintes fórmulas:

$$RGC = 100 \times \frac{mc}{mms}$$

Em que:

RGC = Rendimento gravimétrico em carvão (%);

mc = massa de carvão (kg); e

mms = massa de madeira seca (kg).

$$RGF = 100 \times \frac{mf}{mms}$$

Em que:

RGF = Rendimento gravimétrico em finos (%);

mf = massa de finos (kg); e

mms = massa de madeira seca (kg).

$$RGt = 100 \times \frac{mt}{mms}$$

Em que:

RGt = Rendimento gravimétrico em tiço (%);

mt = massa de tiço (kg); e

mms = massa de madeira seca (kg)

#### **4.7. Propriedades do carvão vegetal**

Para a análise de densidade a granel, foi confeccionada uma caixa de paredes rígidas de tábuas de *Pinus*, com dimensões internas de 60x60x60 centímetros, gerando um volume interno de 0,216m<sup>3</sup>. O procedimento seguiu os seguintes passos: pesagem da caixa; enchimento da caixa com carvão; e pesagem da caixa contendo carvão, obtida dividindo-se a massa de carvão pesada pelo volume da caixa. A densidade a granel foi determinada baseando-se nos procedimentos da norma NBR 6922 da ABNT.

A densidade relativa aparente foi determinada seguindo-se os procedimentos da norma técnica NBR 9195, da ABNT.

Para determinação do teor de umidade do carvão, utilizou-se o método da estufa, obtendo-se a massa seca do carvão a uma temperatura de 65°C até massa constante. Para este procedimento, o carvão foi classificado na peneira de 40 mm e retido na de 20 mm.

As análises de poder calorífico, análise química imediata foram realizadas segundo procedimentos descritos nas respectivas normas NBR 8633, NBR 8112 e NBR 8289 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Para determinação da friabilidade do carvão, utilizou-se uma metodologia desenvolvida na Suécia, em 1946, na qual se empregou um tambor rotatório construído em chapa de aço (espessura de 6,4 mm), com 30 cm de diâmetro e 25 cm de comprimento, contendo, segundo o plano radial, uma chapa de aço soldada na periferia atingindo até o centro (eixo do tambor). Para o ensaio, pesou-se uma amostra de 500 g de carvão, classificado na peneira de 60 mm e retido na de 20 mm, colocado no tambor e submetido a um total de 500 rotações, a uma velocidade de 30 rotações por minuto. Após o teste, o carvão foi novamente peneirado, medindo-se a massa obtida abaixo de 20 mm, expressa em porcentagem. A classificação dos finos gerados pelo teste de friabilidade seguiu a metodologia sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), para carvão vegetal, citado por Oliveira *et al.* (1982).

#### **4.8. Coleta e análise dos gases**

Para proceder à coleta de gases, foram feitos dois orifícios, de aproximadamente 10 cm de diâmetro, na altura média da chaminé, cerca de 2,10 metros, de modo a ficar um perpendicular ao outro. Foi também construída uma plataforma de madeira para dar acesso aos orifícios.

A coleta dos gases na altura média da chaminé foi feita por tubo Pitot tipo “S” conectado ao sistema filtros para retirada do material particulado e de possíveis gotículas de alcatrão. Foram feitas 13 coletas durante toda a carbonização da madeira, sendo as sete primeiras de quatro em quatro horas e as demais de três em três horas.

O número de coletas e os intervalos de tempo entre amostras foram determinados com o objetivo de representar a carbonização como um todo, visto a vazão dos gases não é constante ao longo do tempo.

As amostragens foram feitas conforme procedimentos relacionados às metodologias da ABNT explicitadas na Tabela 3.

**Tabela 3** – Normas utilizadas para procedimentos de coleta e análise dos gases da carbonização

<b>NORMA</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
NBR 8969	Poluição do ar
NBR 12020	Calibração de Equipamentos utilizados na amostragem
NBR 10700	Planejamento de Amostragem em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias
NBR 10701	Determinação de Pontos de Amostragem em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias
NBR 10702	Determinação da Massa Molecular seca e excesso de ar no fluxo gasoso
NBR 11966	Determinação da velocidade e vazão dos gases
NBR 11967	Determinação da Umidade dos Gases
NBR 12019	Determinação da Emissão de Material Particulado
NBR 15213	Poder Calorífico Superior e Inferior

Para os procedimentos de coletas, acondicionamento e armazenamento das amostras de gases, foram observadas as normas EPA – Environmental Protection Agency , Method 18: Coleta em bags.

As análises para determinação das concentrações dos gases foram realizadas segundo as normas ASTM 1945.

Para a determinação da pressão atmosférica local, foi utilizado um barômetro portátil.

Os valores das concentrações obtidos para metano foram convertidos em massa emitida.

Primeiramente foi calculada a vazão do metano através da seguinte equação:

$$V_{gásch} = \frac{Vch \times R}{100}$$

Em que:

$V_{gásch}$  = vazão do gás na chaminé (m<sup>3</sup>/h)

$Vch$  = vazão dos gases na chaminé (m<sup>3</sup>/h)

$R$  = concentração do gás obtida nas coletas (% v/v)

Posteriormente a vazão obtida foi transformada em vazão molar:

$$VM = \frac{Pch \times V_{gásch} \times TN \times NI}{PN \times VN \times Tch}$$

Em que:

$VM$  = vazão molar do gás (mol/h)

$Pch$  = pressão na chaminé (mmHg)

$V_{gásch}$  = vazão do gás na chaminé (m<sup>3</sup>/h)

$TN$  = temperatura normal (273 K)

$NI$  = vazão molar normal (1mol/h)

$PN$  = pressão normal (760 mmHg)

$VN$  = vazão normal do gás (0,0224 mol/h)

$Tch$  = temperatura do gás na chaminé (K)

Por fim calculou-se a taxa de emissão.

$$TE = \frac{VM \times mm}{100}$$

Em que:

$TE$  = taxa de emissão (kg/h)

$VM$  = vazão molar do gás (mol/h)

$Mm$  = massa molar do gás (g/mol)

Após obtidos os valores de taxa de emissão de metano, nas carbonizações com e sem combustão dos gases, para cada uma das 13 coletas, foi calculada, então, a média aritmética da taxa de emissão e este valor médio foi multiplicado pelo tempo de carbonização, para se obter a quantidade total em massa emitida nas carbonizações.

#### **4.9. Delineamento estatístico**

Para avaliar os possíveis efeitos da fornalha no rendimento gravimétrico e na qualidade do carvão vegetal, procedeu-se quatro carbonizações, sendo duas com a fornalha em funcionamento e duas sem a fornalha para efetuar a queima dos gases.

Para avaliar a eficiência da fornalha quanto a queima dos gases foram feitas mais duas carbonizações, uma com a fornalha em funcionamento e outra testemunha, sem queima de gases, de modo a obter a diferença de emissões entre as duas carbonizações.

Os dados dos parâmetros mensurados foram avaliados com auxílio de análise de variância (ANOVA), a 1% de probabilidade pelo teste F.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Propriedades das madeiras utilizadas

A Tabela 4 apresenta as propriedades das madeiras utilizadas nas carbonizações.

**Tabela 4** – Propriedades das madeiras utilizadas nas carbonizações

Material	Teor de umidade (%)	Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	Poder calorífico superior (kcal/kg)	Composição química (%)		
				Extrativos	Lignina total	Holocelulose
<i>Eucalyptus</i> sp.	24,09	0,57	4726,17	4,40	28,67	66,92
Madeira de café	28,72	0,59	4720,00	4,18	27,32	68,50

O teor de lignina da madeira é um parâmetro muito importante para produção de carvão vegetal, pois os outros componentes são degradados com mais facilidade no processo de carbonização, no entanto, a lignina, por ter uma estrutura molecular rica em carbono e mais condensada, é que dará origem à maior parte do carbono presente no carvão vegetal.

Observa-se que o valor obtido neste trabalho para a densidade básica foi acima dos obtidos por Alencar et al. (2002), que observaram valor médio de 0,521 g/cm<sup>3</sup> para densidade da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*, com 7 anos de idade, e os seguintes valores de composição química: 69,9% de holocelulose, 27,38% de lignina e 2,72% de extrativos.

### 5.2. O processo de carbonização

Conforme pode ser observado na Figura 6 (b), o forno tem lateralmente quatro aberturas, sendo uma maior para ignição e três menores para controle das entradas de ar,

além disso, tem uma guilhotina para controle dos gases de saída para a fornalha. A fornalha, por sua vez, também tem quatro aberturas laterais para controle da admissão de ar.

As carbonizações foram conduzidas da seguinte forma: a ignição foi feita nas duas aberturas maiores do forno, uma de cada lado, que, inicialmente, ficaram totalmente abertas. A primeira abertura ao lado do “tatu” de ignição, de ambos os lados, permaneceu fechada durante todo o processo de carbonização. As demais aberturas, de ambos os lados, iniciaram o processo de carbonização semiabertas, ou seja, foram colocados apenas tijolos para impedir parcialmente a entrada de ar.

A guilhotina foi mantida cerca de 15 centímetros acima do piso do forno durante todo o processo. Os termopares do forno foram colocados na parte superior porque a ignição foi efetuada na parte inferior. Depois da ignição no forno, o controle das entradas de ar foi feito observando-se a temperatura lida nos termopares e a presença de brasas incandescentes nas aberturas laterais. Nesta etapa, após ser visível a brasa pelas entradas de ar, elas, ainda, permaneceram abertas pelo tempo necessário para manter a elevação de temperatura na parte superior do forno.

Na fornalha foi colocado um termopar, que ficou em contato com os gases de saída do forno. As aberturas de entrada de ar foram mantidas totalmente fechadas para a carbonização sem queima dos gases e quando ocorria a queima dos gases, as duas aberturas próximas à chaminé, de ambos os lados, foram mantidas abertas.

Para a combustão dos gases na fornalha, primeiramente a mesma foi abastecida com resíduos lignocelulósicos, ocorrendo a ignição no mesmo momento em que era dada a ignição do forno. Este procedimento foi realizado com objetivo de aquecer a fornalha, criando um gradiente de temperatura entre ela e o forno, fazendo com que ocorresse uma sucção mais eficiente dos gases de dentro do forno desde o princípio da carbonização. A partir daí a fornalha foi mantida acesa, sendo abastecida com resíduos, queimando os gases, até o momento em que estes atingissem a temperatura de  $\pm 120^{\circ}\text{C}$ . Acima desta temperatura, não mais foi necessário queimar resíduos, uma vez que a chama na câmara de combustão permaneceu acesa e constante até o final da carbonização.



### 5.3. Carbonização da madeira

#### 5.3.1. Carbonização com madeira de café

A Figura 9 mostra a variação de temperatura no forno e na fornalha em função do tempo de carbonização da madeira de café.

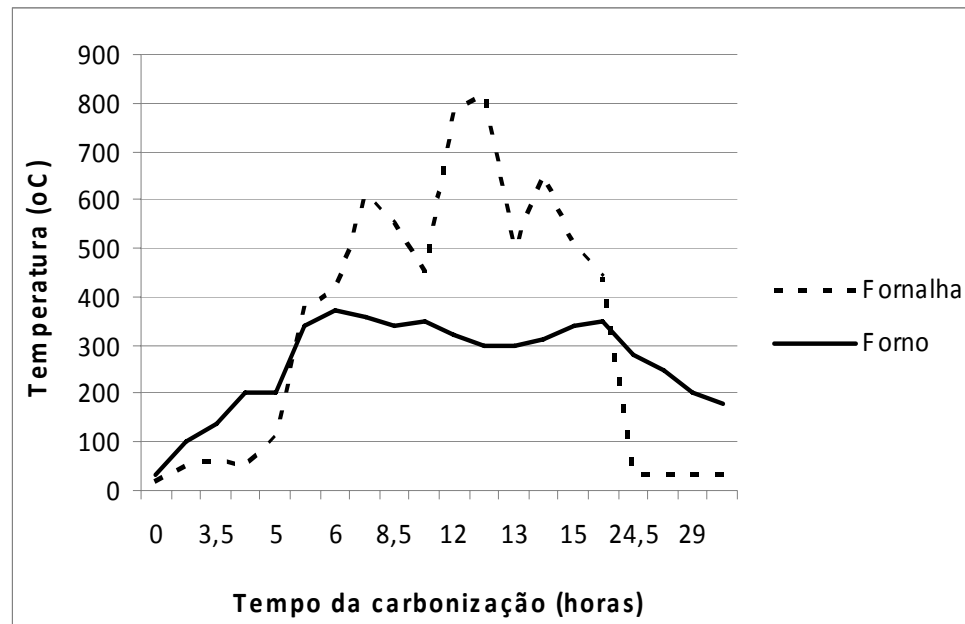


Figura 9 – Variação da temperatura em função do tempo de carbonização.

O tempo total de carbonização teve duração média de 27 horas chegando à temperatura máxima de carbonização de 370°C, 6 horas após a ignição. A temperatura de carbonização permaneceu por aproximadamente 19 horas acima de 300°C. Após o fechamento do forno, com a restrição da oxigenação, observou-se a redução da temperatura, iniciando o processo de resfriamento.

A combustão dos gases na fornalha ocorreu com eficiência cinco horas após a ignição, quando a temperatura atingiu  $\pm 120^{\circ}\text{C}$ . A temperatura máxima atingida dentro da fornalha foi de 820°C, e o período constante de queima dos gases foi, aproximadamente, 10 horas, equivalente a 37% do tempo total da carbonização.

Observa-se dois pontos de quedas de temperatura da fornalha, isso foi ocasionado por tentativas de se controlar o aumento brusco de temperatura dentro da mesma, pois desacelerando a taxa de elevação da temperatura reduz os danos físicos à estrutura da fornalha.

### 5.3.1.1. Rendimento gravimétrico da carbonização com madeira de café.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de rendimento gravimétrico da carbonização com madeira de café.

**Tabela 5** – Rendimento gravimétrico da carbonização com madeira de café.

<b>Materiais</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>Rendimento (%)</b>
Madeira	1900	-----
Madeira seca	1354,3	100
Carvão vegetal	391,6	28,9
Finos	100,7	7,4
Tiço	81,4	6,0

Conforme descrito na metodologia, o diâmetro médio da madeira de café utilizada foi de 7 cm, valor abaixo do recomendado para produção de carvão vegetal. Por isso, esperava-se um baixo rendimento gravimétrico, porém, o valor obtido pode ser considerado razoável, o que pode ser explicado pelas propriedades da madeira, principalmente a densidade básica de  $0,59 \text{ g/cm}^3$ . Porém, pelo mesmo motivo, a geração de finos no forno foi maior (7,4%).

A formação de “tiço” ocorreu numa área específica dentro do forno, próxima à parte inferior da porta, provavelmente, devido à tiragem de gases que ocorre na parte de trás do forno. Após a ignição do forno, o calor tende a ir para sua parte superior, ou seja, o forno se aquece primeiro na parte de cima, depois o calor lentamente desce, porém, ao descer, o mesmo é conduzido para parte de trás do forno, onde há a saída de gás, fazendo com que nessa região não se atinja a temperatura máxima de carbonização.

### 5.3.1.2. Propriedades do carvão da madeira de café.

A Tabela 6 mostra os valores médios das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal obtido da madeira de café.

**Tabela 6** – Propriedades do carvão da madeira de café

Propriedades	Umidade (%)	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade a granel (kg/m <sup>3</sup> )	Friabilidade (%)	Poder calorífico superior (kcal/kg)	Análise química imediata (%)		
						TMV	TC	TCF
Valores médios	3,73	310	189,81	26,18	7405,33	21,94	1,62	76,43

TMV: Teor de Materiais Voláteis; TC: Teor de Cinzas; TCF: Teor de Carbono Fixo

No teste de friabilidade, obteve-se um valor de 26,18% de finos, valor classificado como bastante friável, ou seja, é um carvão bastante propício a gerar finos quando submetido à abrasão e choques mecânicos, o que é indesejável principalmente quando do seu transporte para siderurgia e mesmo sua utilização em altos-fornos.

Segundo Santos (2008), os valores de propriedades de carvão vegetal para siderurgia são: teor de umidade entre 0 e 6%, densidade entre 180 e 350 Kg/m<sup>3</sup>, geração de finos entre 16 e 24%, teor de carbono fixo de 70 a 80%, teor de materiais voláteis de 25 a 35% e teor de cinzas de 0,5 a 4%.

A densidade, tanto a granel quanto a densidade relativa aparente, obtida para este carvão, está dentro dos parâmetros para utilização em siderurgia, bem como o teor de umidade.

O poder calorífico dos carvões provenientes de madeira de eucalipto, geralmente utilizados para siderurgia, apresenta valor de PCS entre 7000 e 8000 kcal/kg, portanto, o valor obtido para o carvão da madeira de café está condizente com este parâmetro. Vale ressaltar que, além da função redutora do carvão vegetal dentro do alto forno, ele também tem o papel de fornecer energia para o sistema, atuando como um termorreduzidor, assim, quanto maior o poder calorífico, maior é a energia liberada para o sistema.

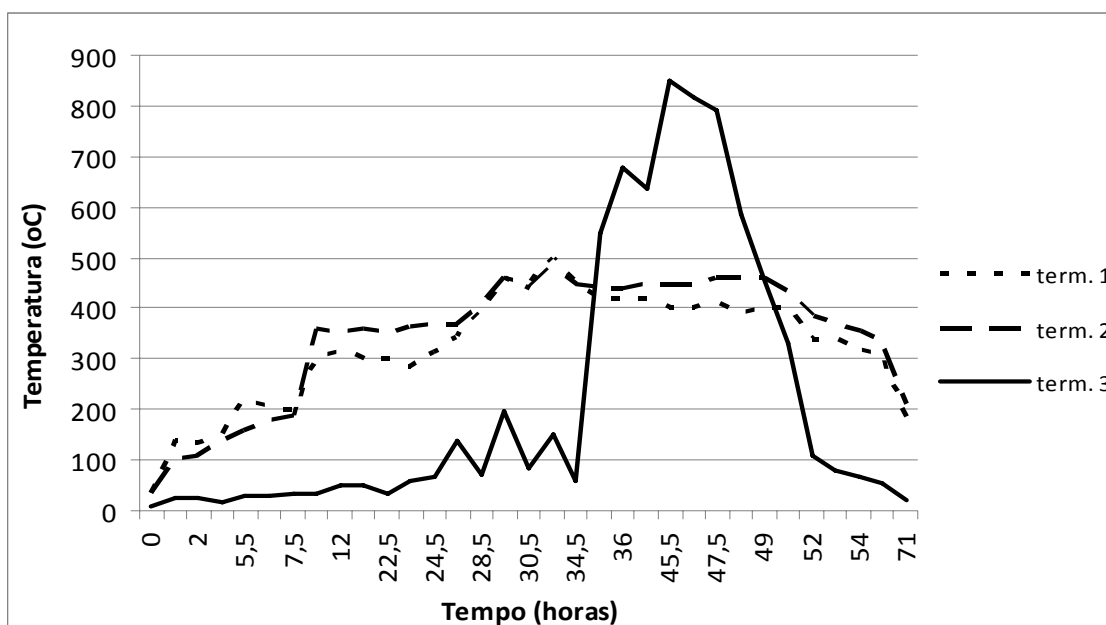
Na análise química imediata do carvão, foram obtidos valores de carbono fixo e cinzas de acordo com o especificado para uso em siderurgia, já o teor de materiais voláteis foi inferior, segundo Santos (2008), porém não o desclassificando para tal uso.

## 5.4. Carbonização com madeira de *Eucalyptus* sp.

### 5.4.1. Carbonização com combustão dos gases

Foram feitas duas carbonizações com a madeira de *Eucalyptus* sp., com e sem combustão dos gases, com o objetivo de detectar possíveis efeitos da utilização da fornalha no rendimento e na qualidade do carvão vegetal.

A Figura 10 apresenta o perfil térmico da primeira carbonização da madeira de eucalipto com a combustão dos gases pela fornalha.



Term. 1 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à porta.

Term. 2 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à saída dos gases.

Term. 3 : termopar colocado na saída de gases do forno para fornalha.

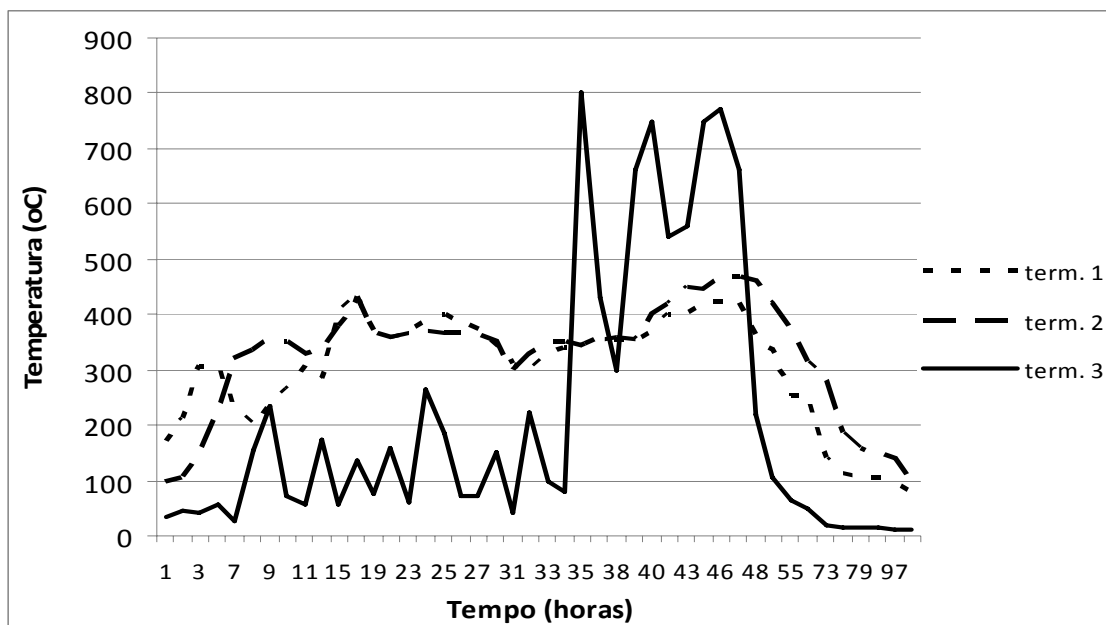
**Figura 10** – Variação da temperatura em função do tempo da primeira carbonização com combustão dos gases pela fornalha.

A temperatura máxima de carbonização ( $500^{\circ}\text{C}$ ) ocorreu após 31,5 horas da ignição. O fechamento total do forno ocorreu após 52 horas de carbonização, quando a fornalha cessou à queima dos gases, e o seu fluxo e temperatura diminuíram, indicando o fim do processo.

No período entre 24,5 horas e 34,5 horas de carbonização, os gases começaram a ser queimados na fornalha, porém com algumas interrupções, sendo necessário seu reacendimento. No entanto, a partir da 35<sup>a</sup> hora de carbonização, os gases foram

queimados com eficiência, por cerca de 17 horas ininterruptas, atingindo a temperatura máxima de 850°C, ou seja, a fornalha funcionou por aproximadamente 33% do tempo de carbonização.

A Figura 11 apresenta o perfil térmico da segunda carbonização da madeira de eucalipto com queima de gases pela fornalha, da qual se fez a coleta para as análises qualitativas e quantitativas.



Term. 1 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à porta.

Term. 2 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à saída dos gases.

Term. 3 : termopar colocado na saída de gases do forno para fornalha.

**Figura 11** – Variação da temperatura em função do tempo da segunda carbonização com combustão dos gases pela fornalha.

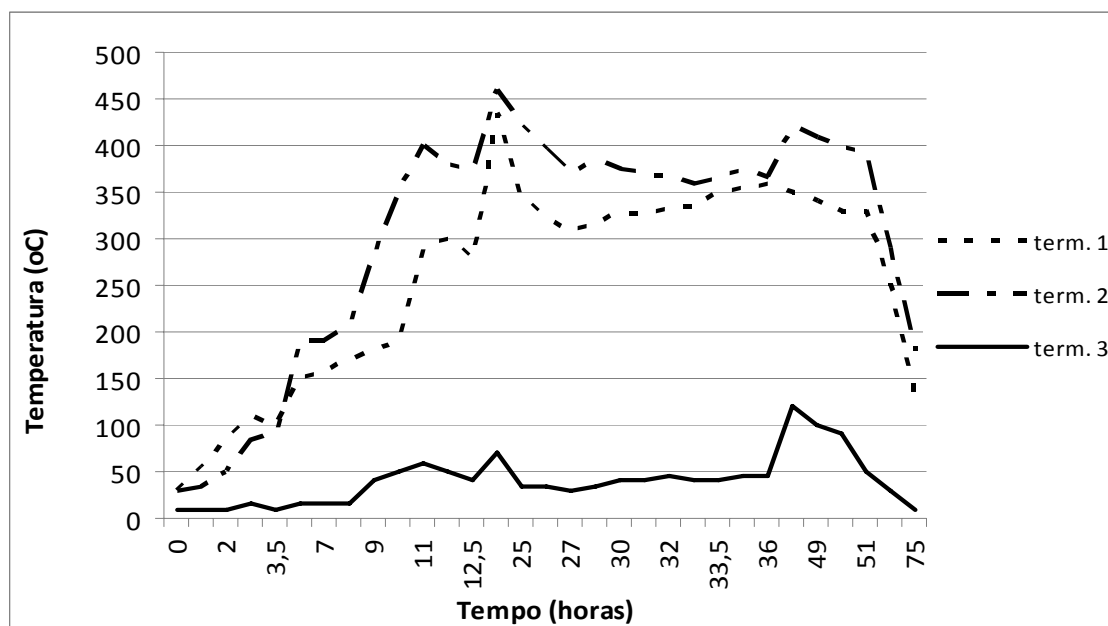
A temperatura máxima de carbonização foi de 470°C, atingida após 48 horas de carbonização. O fechamento total do forno ocorreu após 52 horas a partir da ignição.

Nesta carbonização, a combustão dos gases na fornalha ocorreu de maneira a coincidir com os períodos de coleta dos gases, ou seja, foram feitas 13 coletas, sendo as 7 primeiras em intervalos de 4 em 4 horas, e as 6 últimas em intervalos de 3 em 3 horas. Do mesmo modo, procedeu-se ao acendimento da fornalha para queima dos gases até o momento em que ela permaneceu acesa constantemente, após cerca de 35 horas de carbonização, sendo feito, a partir daí, apenas o controle da queima. A temperatura máxima na fornalha foi de 800°C.

#### 5.4.2. Carbonização sem combustão dos gases

Nesta etapa, a carbonização ocorreu sem o funcionamento da fornalha, ou seja, liberando livremente os gases pela chaminé, sem fazer sua combustão.

A Figura 12 mostra o perfil térmico da carbonização da madeira de eucalipto, sem combustão de gases pela fornalha.



Term. 1 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à porta.

Term. 2 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à saída dos gases.

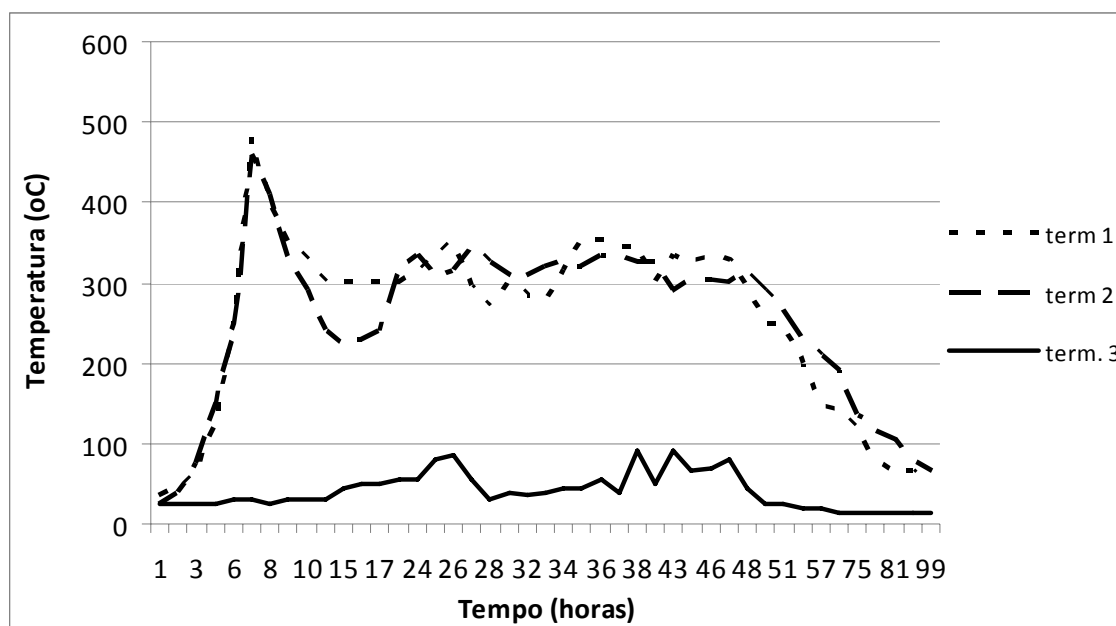
Term. 3 : termopar colocado na saída de gases do forno para fornalha.

**Figura 12** – Variação da temperatura em função do tempo da primeira carbonização da madeira de eucalipto, sem combustão dos gases, pela fornalha.

A temperatura máxima de carbonização foi de 460°C, atingida após 24 horas da ignição. O fechamento do forno ocorreu após aproximadamente 52 horas de carbonização, quando a fumaça na chaminé cessou e a temperatura dentro do forno começou a cair naturalmente.

Desde o início do processo, as entradas de ar da fornalha foram mantidas fechadas, evitando-se sua oxigenação, para que não ocorresse a queima espontânea dos gases, conforme foi confirmado em testes preliminares. A temperatura máxima da fornalha foi de 120°C, atingida após 48 horas de carbonização. Neste momento, as entradas de ar da fornalha foram abertas para que ela resfriasse, evitando-se a queima dos gases, uma vez que nessa temperatura os gases da carbonização entram em combustão, conforme demonstraram testes preliminares.

A Figura 13 apresenta o perfil térmico da segunda carbonização sem combustão dos gases pela fornalha, realizada para coleta dos gases.



Term. 1 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à porta.

Term. 2 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à saída dos gases.

Term. 3 : termopar colocado na saída de gases do forno para fornalha.

**Figura 13** – Variação da temperatura em função do tempo da segunda carbonização da madeira de eucalipto, sem combustão dos gases pela fornalha.

A temperatura máxima de carbonização foi de 480°C, atingida após cerca de 7 horas da ignição. O fechamento total do forno ocorreu após 52 horas de carbonização.

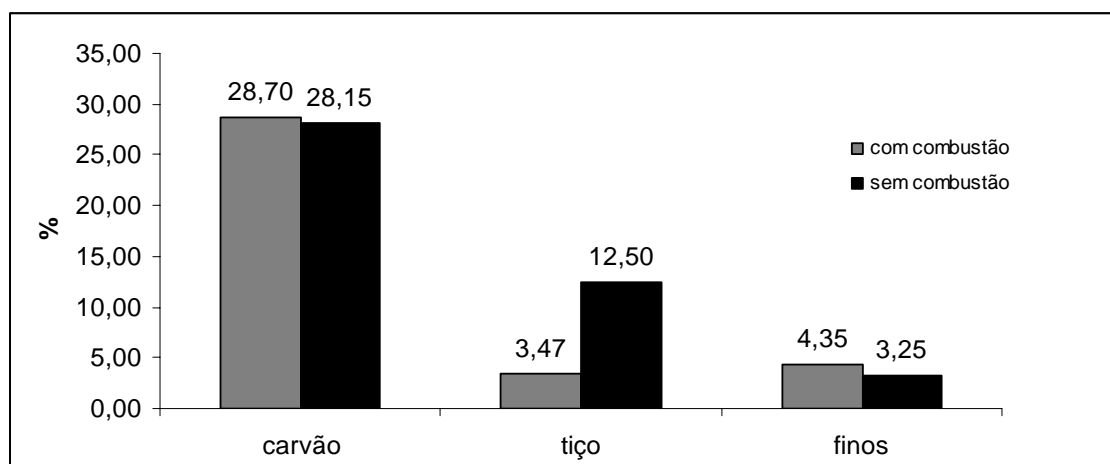
Nesta etapa, a coleta dos gases foi feita da mesma maneira da carbonização com queima de gases, porém, como o objetivo neste caso é coletar os gases liberados sem a sua queima, evitou-se a elevação da sua temperatura, que não ultrapassou os 100°C, controlando-se as entradas de ar da fornalha e do forno.

#### 5.4.3. Rendimento gravimétrico das carbonizações com madeira de *Eucalyptus* sp.

A Tabela 7 e a Figura 14 mostram os valores médios de rendimento gravimétrico das carbonizações com madeira de eucalipto, em massa e percentagem, respectivamente.

**Tabela 7** – Rendimento gravimétrico, em massa, das carbonizações com madeira de eucalipto.

Carbonizações	Teor de umidade (%)	Madeira (Kg)	Madeira seca (Kg)	Carvão (Kg)	Tiço (Kg)	Finos (Kg)
c/ combustão de gases 1	26,42	3648	2684,2	736,5	80	154
c/ combustão de gases 2	23,61	3509	2680,5	805	108,5	78
s/ combustão de gases 1	20,19	3632	2899	788,5	349	104
s/ combustão de gases2	26,15	3225	2381,7	692	285	68



**Figura 14** – Valores médios do rendimento gravimétrico, em porcentagem, das carbonizações com madeira de eucalipto.

O rendimento em carvão vegetal das carbonizações não diferiu significativamente, pelo teste F a 1% de probabilidade. Os valores obtidos foram considerados baixos, visto que era esperado um rendimento médio de 30%, evidenciando a necessidade de ajustes no dimensionamento, principalmente da chaminé, além de melhorias no controle do processo.

A formação de “tiço” foi significativamente superior para carbonização sem queima de gases, 12,5%, contra 3,5%, observados na carbonização com queima de gases. Estes valores obtidos estão relacionados com a geração de finos, pois se obteve maior porcentagem de finos na carbonização com queima de gases, 4,35%, contra 3,25%, da carbonização sem queima de gases. E isso aconteceu porque na carbonização com queima de gases há, desde o princípio do processo, o acendimento da fornalha, ocasionando um gradiente de temperatura entre ela e o forno, fazendo com que a sucção dos gases seja maior, acelerando o processo de carbonização. Este fato pode explicar o baixo valor de “tiço” obtido, e, também, em contrapartida, o maior valor de geração de finos.



A formação de “tiço” ocorreu, em ambas as carbonizações, na parte inferior próximo à porta do forno, isso se deve ao fato de a carbonização ocorrer de cima para baixo, ou seja, o forno se aquece primeiro na parte superior, depois a frente de carbonização desce ao mesmo tempo em que se direciona para a parte de trás do forno, onde há a tiragem dos gases. Assim, na carbonização com combustão de gases, onde a tiragem dos gases é mais forçada, houve maior contato do calor com a parte inferior do forno, formando menos “tiço” em comparação com a carbonização sem combustão de gases.

#### 5.4.4. Propriedades do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus* sp.

A Tabela 8 apresenta os valores médios das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal da madeira de eucalipto produzidos nas carbonizações com e sem queima de gases pela fornalha.

**Tabela 8** – Valores médios das propriedades do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus* sp.

carbonização	Propriedades							
	Umidade (%)	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade granel (kg/m <sup>3</sup> )	Friabilidade (%)	Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	Análise química imediata (%)		
						TMV	TC	TCF
Com combustão	3,38 a	447 a	218,07 a	16,41 b	7929,65 a	16,67 b	0,75 a	82,56 a
Sem combustão	4,01 a	435 a	220,75 a	18,20 a	7662,07 b	23,82 a	0,71 a	75,45 a

TMV: Teor de Materiais Voláteis; TC: Teor de Cinzas; TCF: Teor de Carbono Fixo

Os valores obtidos para teor de umidade, densidade relativa aparente e densidade a granel não foram significativamente distintos, mostrando que, para essas propriedades, a queima dos gases efetuada pela fornalha não alterou a qualidade do carvão.

A friabilidade diferiu significativamente entre os carvões, porém, de acordo com a classificação do Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec) para carvão vegetal, citado por Oliveira *et al.* (1982), o carvão de ambas as carbonizações foram considerados medianamente friáveis.

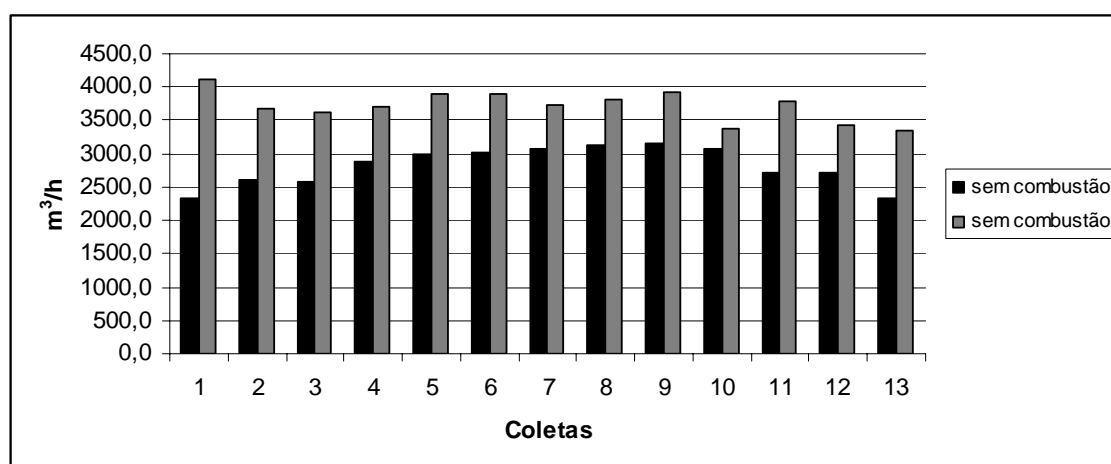
O valor medido de PCS para o carvão das duas carbonizações foi superior ao encontrado na literatura para *E. urophylla* e *E. grandis*, de 7439 kcal/kg e 6626 kcal/kg, respectivamente (PEREIRA et al., 2000, citados por COUTO et al., 2003). A superioridade do valor de poder calorífico superior obtido para o carvão produzido com queima de gases pode ser explicada pelo valor médio superior de teor de carbono fixo que este possui, evidenciando uma relação direta entre estes parâmetros.

De acordo com as especificações do carvão vegetal para uso siderúrgico descritas por Santos (2008), observa-se na Tabela 8 que os valores médios de umidade e densidade obtidos com ou sem a fornalha em funcionamento estão de acordo com aqueles normalmente aceitos nas usinas siderúrgicas para o processo de redução. Vale ressaltar que carvões com altos teores de umidade e baixa densidade apresentam baixa resistência mecânica e podem acarretar geração de finos dentro dos altos fornos, provocando impermeabilidade dos gases de redução, além de reduzir a capacidade volumétrica.

Na análise química imediata houve diferença significativa do teor de carbono fixo e do teor de materiais voláteis entre os carvões estudados, sendo que o carvão obtido na carbonização com queima de gases obteve maior teor de carbono fixo e menor teor de materiais voláteis. O teor de cinzas não diferiu significativamente entre os carvões produzidos com queima e sem queima dos gases.

### 5.5. Análise dos gases da carbonização

A Figura 15 mostra a vazão dos gases das carbonizações sob condições reais de temperatura e pressão na saída da chaminé.

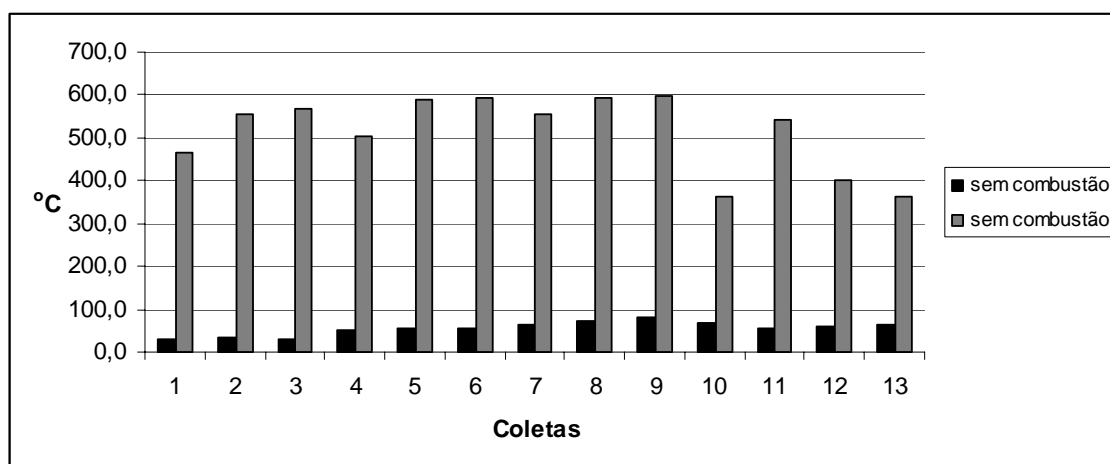


**Figura 15** – Vazão real dos gases na saída da chaminé.

A vazão média sem queima dos gases foi de 2814,47 m<sup>3</sup>/h, já com queima dos gases esse valor aumentou para 3718,68 m<sup>3</sup>/h, sendo essa diferença significativa. O aumento nos valores de vazão quando se procede à combustão dos gases evidencia uma aceleração do processo de carbonização, o que se traduz em maiores cuidados na sua condução pelas entradas de ar e da guilhotina. Por este motivo também se pode explicar uma menor geração de tiço nas carbonizações com combustão dos gases, uma vez que o tempo de carbonização foi sempre o mesmo.

A vazão da carbonização com combustão dos gases foi maior devido a um maior gradiente de temperatura entre a fornalha e o ambiente externo, observando que sua variação de temperatura não tem influência no processo, visto que a amplitude é baixa, enquanto na fornalha a amplitude de variação de temperatura chega 730°C, comparando-se os processos com e sem combustão dos gases. Portanto, a carbonização sem combustão dos gases apresenta uma temperatura máxima na fornalha de 120°C contra 25°C do ambiente externo, já no processo com combustão dos gases a temperatura máxima na fornalha atinge 850°C, contra os mesmos 25°C do ambiente, o que pode explicar esse aumento na vazão, pois durante a queima faz-se necessário a abertura laterais da fornalha para admissão do ar atmosférico para fornecer oxigênio para as reações de oxidação, e conseqüentemente o volume de gases é aumentado proporcional a quantidade de ar atmosférico admitido.

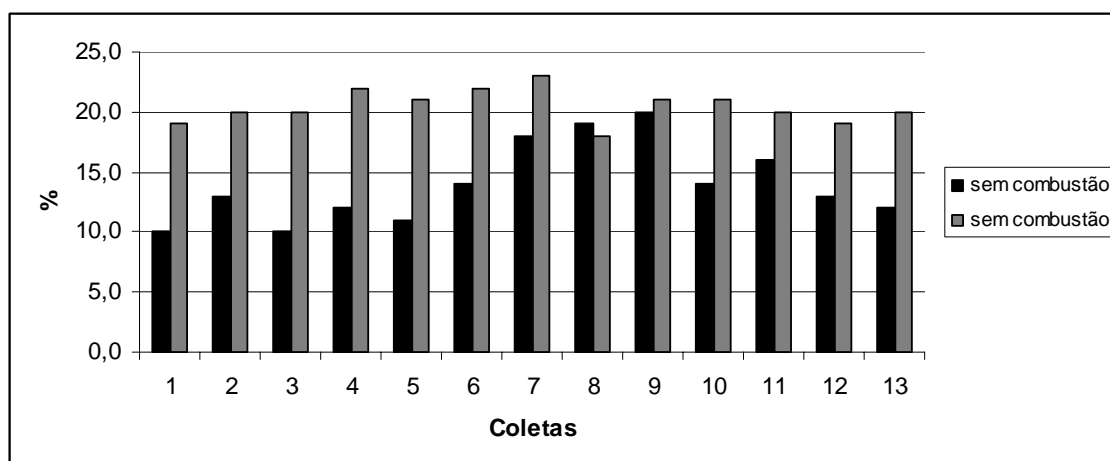
A Figura 16 mostra os valores médios de temperatura dos gases na saída da chaminé durante as coletas.



**Figura 16** – Temperatura média dos gases na saída da chaminé durante as coletas

A temperatura média dos gases na chaminé, na carbonização sem combustão dos gases, foi de 55,21°C, e na carbonização com combustão, de 514,97°C, evidenciando a energia liberada na forma de calor pela combustão dos gases combustíveis na fornalha.

A Figura 17 mostra os valores médios de teor de umidade dos gases obtidos na saída da chaminé.

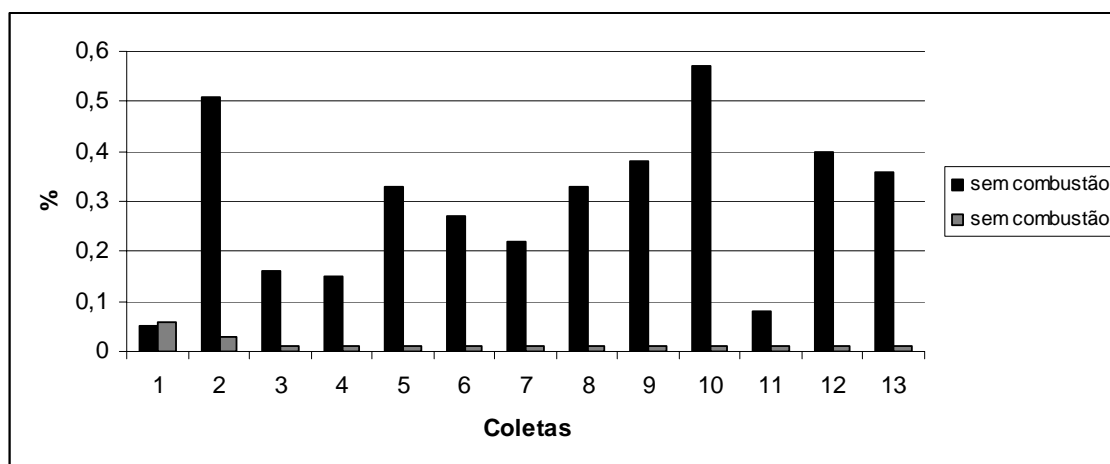


**Figura 17** – Teor de umidade dos gases obtidos na saída da chaminé.

O teor de umidade médio dos gases com e sem combustão dos gases pela fornalha foram de 14% e 20,46% respectivamente, tendo essas diferenças significativas entre si, mostrando com isso um aumento de vapor de água formado quando se procedeu a combustão, o que pode ser explicado pelo fato de quando ocorre a combustão completa de um material, espera-se que sejam liberados  $\text{CO}_2$ , vapor de água e energia.

Este dado é, portanto, um indicativo da eficiência da fornalha para queima dos gases da carbonização.

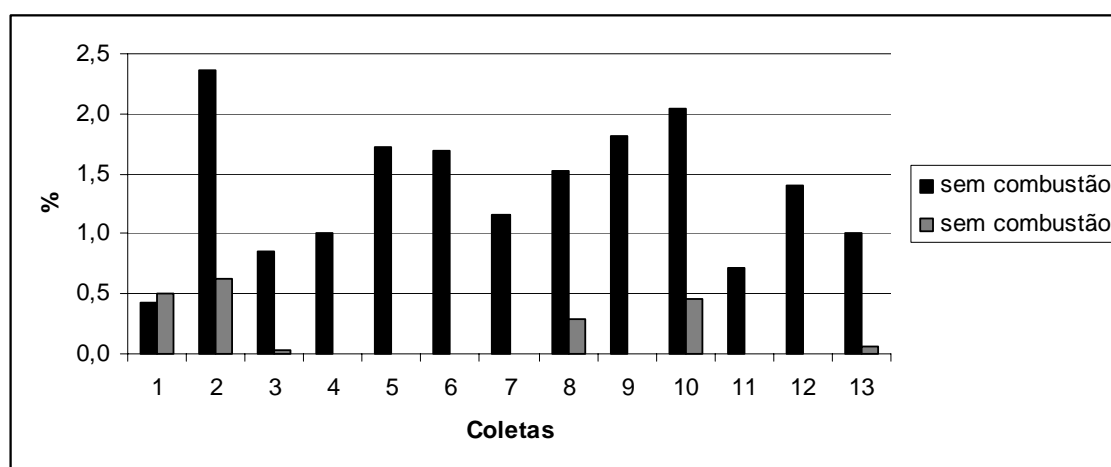
A Figura 18 mostra as concentrações de metano liberadas nas carbonizações com e sem combustão dos gases pela fornalha.



**Figura 18** – Concentrações de metano liberadas durante as carbonizações.

As concentrações de metano foram reduzidas a valores próximos a zero com a combustão dos gases pela fornalha, passando de 0,293% para 0,015%, tendo uma redução de 96,95%. Esse fato demonstra a eficiência de poder oxidativo do sistema, reduzindo quase a totalidade da emissão de um dos gases mais nocivos ao meio ambiente. É ainda de extrema importância para adicionalidade em projetos de crédito de carbono, pois, apesar de a madeira utilizada no processo ser de reflorestamento, o que não contabiliza o CO<sub>2</sub> liberado, a redução da emissão de metano no processo permite a criação de projetos visando a créditos de carbono.

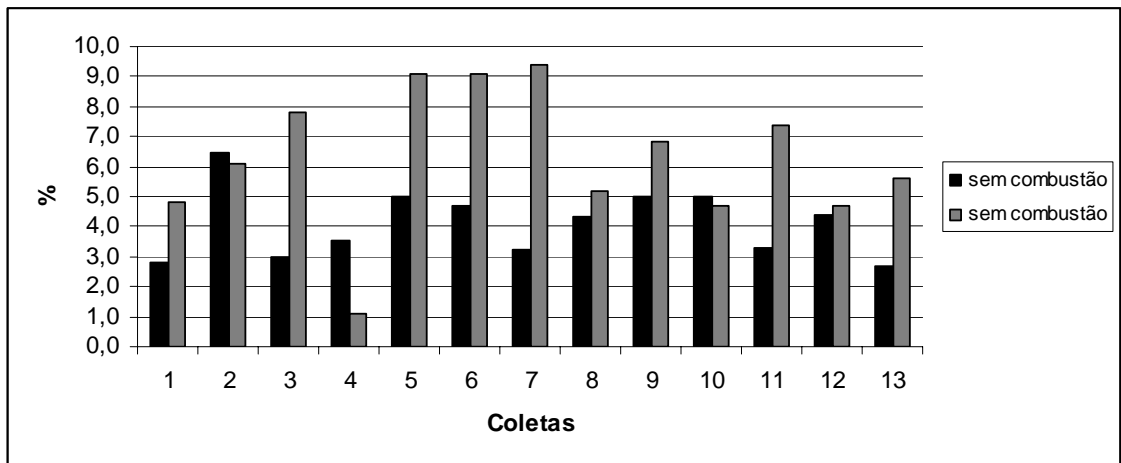
A Figura 19 mostra as concentrações de monóxido de carbono liberadas nas carbonizações com e sem combustão dos gases pela fornalha.



**Figura 19** – Concentrações de monóxido de carbono nas carbonizações.

De acordo com o observado na Figura 19, houve redução significativa nas concentrações de monóxido de carbono quando se procedeu a combustão dos gases, atingindo a concentração média de 0,151%, contra os 1,36% observado sem a combustão, tendo uma redução de aproximadamente (93,76%). Com isso é evidenciando que a maior parte desse gás foi oxidada e liberada na forma de CO<sub>2</sub>.

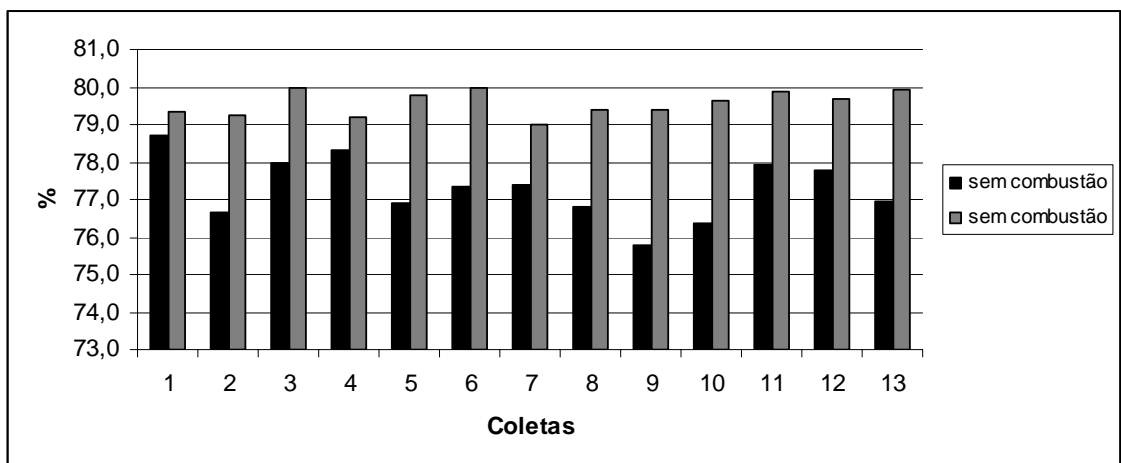
A Figura 20 mostra as concentrações de dióxido de carbono liberadas nas carbonizações com e sem combustão dos gases pela fornalha.



**Figura 20** – Concentrações de dióxido de carbono nas carbonizações.

O valor médio da concentração de dióxido de carbono sem combustão de gases foi de 4,11% e de 6,29% com combustão. Este aumento expressa as reações de oxidação ocorridas durante a combustão dos gases na fornalha, ou seja, os gases como CO, CH<sub>4</sub> e outros foram oxidados a CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e energia. Este aumento significativo da concentração de dióxido de carbono demonstra indiretamente a eficiência da fornalha para redução da emissão dos poluentes mais nocivos, como principalmente o metano, uma vez que o CO<sub>2</sub> é produto da oxidação deste gás.

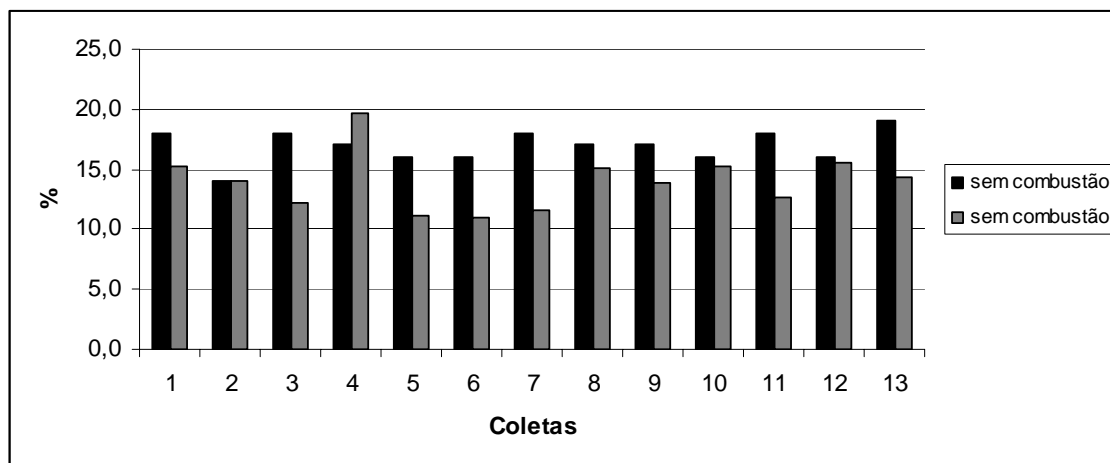
A Figura 21 mostra as concentrações de nitrogênio liberadas nas carbonizações com e sem combustão dos gases pela fornalha.



**Figura 21** – Concentrações de nitrogênio nas carbonizações.

Os valores médios das concentrações de nitrogênio foram de 77,31 e 79,58%, nas carbonizações sem e com combustão dos gases, respectivamente.

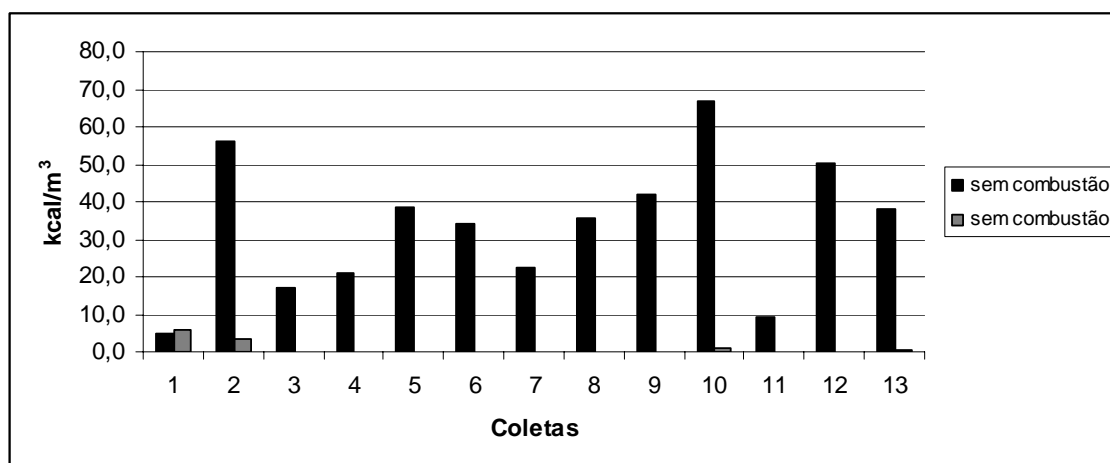
A Figura 22 mostra as concentrações de oxigênio liberadas nas carbonizações com e sem combustão dos gases pela fornalha.



**Figura 22** – Concentrações de oxigênio nas carbonizações.

A concentração média de oxigênio diminuiu com a combustão dos gases, passou de 16,92 para 13,97%, o que era esperado, uma vez que a queima é um processo de oxidação, no qual o oxigênio reage com os gases liberados na carbonização, liberando essencialmente CO<sub>2</sub> e água na forma de vapor, ou seja, o oxigênio é consumido durante a reação de oxidação.

A Figura 23 mostra os valores de poder calorífico dos gases nas carbonizações.



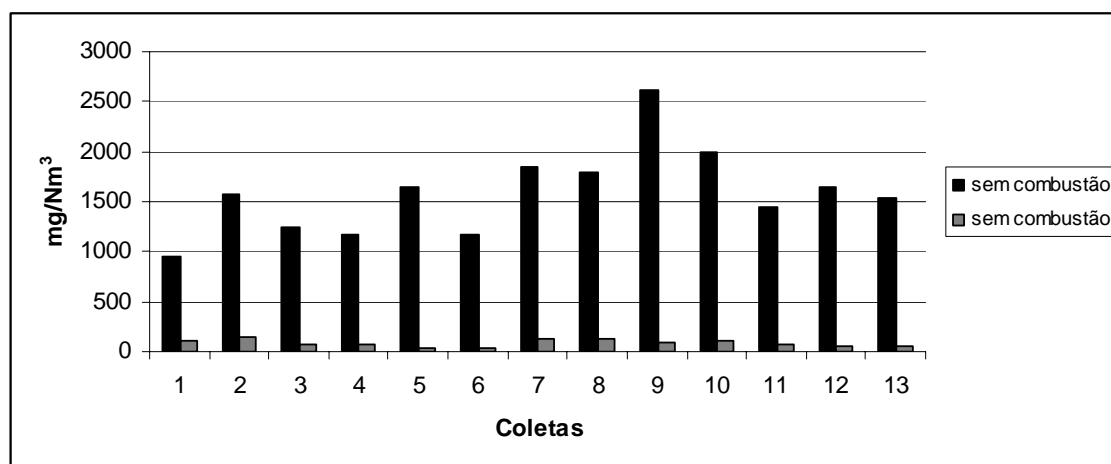
**Figura 23** – Valores de poder calorífico dos gases nas carbonizações.

O poder calorífico dos gases da carbonização sem a combustão pela fornalha atingiu valor máximo de 65 Kcal/m<sup>3</sup>, e quando a fornalha foi utilizada o poder calorífico foi reduzido a praticamente zero, mostrando que os gases foram queimados, liberando essa energia na forma de calor.

O valor de poder calorífico médio na carbonização sem queima dos gases foi de 33,49 Kcal/m<sup>3</sup>, multiplicando este valor pela vazão média, 2814,47 m<sup>3</sup>/h, tem-se uma quantidade de energia de 94.256,60 kcal/h, como a carbonização durou 52 horas, são 4.901.343,22 kcal liberadas em uma carbonização. Considerando um poder calorífico superior de madeira de 4726,17 kcal/kg, a energia liberada na carbonização corresponde à queima, ou combustão direta, de 1.037,06 kg de madeira seca, e se for considerado um teor de umidade de 30%, esse valor aumenta para 1.348,19 kg. Portanto, há liberação de uma quantidade de energia importante, equivalente à combustão direta de uma grande quantidade de madeira, que pode ser utilizada para diversos fins.

Este dado demonstra que a fornalha pode ser mantida funcionando sem a necessidade de queimar resíduos, eliminando possíveis gastos com tal operação, mas para tanto se faz necessário desenvolver um sistema com aproximadamente com no mínimo dois fornos acoplados a uma fornalha, de modo a permitir o funcionamento sincronizado entre eles, ou seja, quando um forno estiver na fase inicial da carbonização, fase em que os gases são queimados com dificuldade, sendo necessário a queima de resíduos, outro já esteja na fase exotérmica, liberando gases combustíveis com maior poder calorífico.

A Figura 24 mostra os valores médios de material particulado presente nos gases nas carbonizações.



**Figura 24** – Material particulado nos gases nas carbonizações

Observa-se que a utilização da fornalha para combustão dos gases reduziu consideravelmente a quantidade de material particulado liberado no processo de carbonização, a emissão reduziu de 1585,88 mg/Nm<sup>3</sup> para 81,67 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondendo a 94,85% menos de material particulado emitido. Esse fato pode ser considerado um ganho para o processo, uma vez que melhora as condições de trabalho



para o operador do forno, além de diminuir a poluição nas localidades, muitas vezes urbanizadas, próximas à unidade de produção de carvão vegetal.

### **5.5.1. Redução da massa de metano com a combustão dos gases**

Utilizando as equações descritas na metodologia, foi calculado a redução em massa de metano, com a utilização da fornalha para combustão dos gases.

Houve uma redução de mais de 96% na emissão de metano, ou seja, em uma carbonização sem combustão dos gases, com tempo de duração de 52 horas, seriam emitidos 236,16 kg do gás, já com a combustão dos gases pela fornalha, esse valor cai para apenas 7,2kg. Assim, ao se proceder à carbonização com queima dos gases durante um ano, fazendo 4 carbonizações por mês, estariam sendo deixadas de emitir aproximadamente 11 toneladas de metano, o que equivaleria em 231 t eCO<sub>2</sub>.

Verifica-se com estes valores que um projeto incluindo a queima de gases na carbonização tem potencial de ser uma atividade elegível como modalidade de MDL.

A cotação do crédito de carbono em 29 de janeiro de 2010 era de €1,41 referentes a uma tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente para créditos (CERs) emitidos em dezembro de 2010 (ECX, 2010). Assim, observando a redução do metano em um sistema de forno-fornalha para queima de gases da carbonização, ao longo do ano, levando-se em consideração dezembro de 2010, seria gerado o valor de €2.635,71 de receita bruta, valor que supera o custo de implantação do sistema. As receitas geradas nos anos posteriores poderiam servir como um acréscimo de renda ao produtor de carvão. Neste caso, não foram consideradas as emissões do projeto e nem os custos de elaboração do projeto e negociação dos créditos, entretanto, acredita-se que haverá aumento da viabilidade econômica da produção de carvão com a queima de gases.

## 6. CONCLUSÕES

A estrutura do forno é adequada, uma vez que suportou as carbonizações, necessitando apenas de pequenos reparos. Porém, é necessário um estudo de materiais com o objetivo de reduzir o custo de construção.

A fornalha funcionou adequadamente como queimador de gases da carbonização, tendo mais de 30% do tempo total de carbonização com chama constante na câmara de combustão, reduzindo quase totalmente os gases de efeito estufa.

A combustão dos gases na fornalha não influenciou o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e reduziu a quantidade de tiço, porém aumentou a proporção de finos, evidenciando a necessidade de um maior controle da carbonização pela guilhotina, uma vez que a queima dos gases aumenta a velocidade de carbonização da madeira.

De modo geral, a utilização da fornalha não afetou as propriedades físicas e químicas dos carvões.

O gasto de combustível para manter a fornalha funcionando é desprezado a partir do momento em que se usa uma fornalha central para no mínimo dois fornos, carbonizando de modo sincronizado, objetivando manter a fornalha constantemente acesa apenas queimando os gases combustos da carbonização.

Os gases de efeito estufa, principalmente metano e monóxido de carbono, foram reduzidos eficientemente pela utilização da fornalha, tendo a quantidade liberada diminuída em 96,95 e 93,76%, respectivamente.

Recomendam-se outros estudos para redimensionar principalmente a chaminé e a câmara de combustão da fornalha para um melhor controle da carbonização e aproveitamento da energia do forno para sua posterior utilização como fonte de calor, para secagem da madeira, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

ASSIS, J. B. Base florestal de Minas Gerais. In: SEMINÁRIO DE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE EUCALIPTO, (II MADETEC), 2., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa, MG: SIF, 2003. p.32-42.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA, AMS. **Números do setor**. Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 15 ago.2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 14929** – Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos – Método de determinação em estufa.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 6923**. Carvão vegetal amostragem e preparação da amostra, Out/1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6922** Carvão vegetal– determinação da massa específica (densidade a granel),Out/1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 8289** - Determinação do teor de cinza. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT, **NBR8112**, Análise imediata do carvão vegetal – Teor de carbono fixo, voláteis e cinzas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 8969/85**, **Poluição do Ar**, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 12020**, Calibração de Equipamentos utilizados na amostragem, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 12019**,  
Determinação da Emissão de Material Particulado, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 10700**,  
Planejamento de Amostragem em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 10701**,  
Determinação de Pontos de Amostragem em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias,  
1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 10702**,  
Determinação da Massa Molecular seca e excesso de ar no fluxo gasoso, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 11966**,  
Determinação da velocidade e vazão dos gases, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 11967**,  
Determinação da Umidade dos Gases, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT , **NBR 15213**, Gás  
natural e outros combustíveis gasosos - Cálculo do poder calorífico, densidade absoluta,  
densidade relativa e índice de Wobbe a partir da composição, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT, **NBR 8633**.  
Brasília, 1983. n. p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **NORMAS  
ABCP**. Normas técnicas ABTCP. São Paulo, ABTCP, 1974. n. p.

**ASTM E260 - 96(2006)** Standard Practice for Packed Column Gas Chromatography.

**ASTM D 1945-96**. Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas  
Chromatography.

**ASTM** . Standard method for chemical analyses of wood charcoal. Phyladelphia: 1977.  
1042p.

ALENCAR, G. S. B.; BARRICHELO, L. E. G.; SILVA JÚNIOR, F. G. Qualidade da madeira de híbrido de *E. grandis* x *E. Urophylla* e seleção precoce. In: **35º Congresso e Exposição Anual de Celulose e Papel**, 2002, São Paulo. Disponível em ><http://www.celuloseonline.com.br/imagembank/Docs/DocBank/dc/dc054.pdf><

Acesso em 22 de fevereiro de 2010

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. O processo de carbonização contínua da madeira. In: **Produção e Utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte – MG, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. 393p. 1982.

ARANTES, M. D. C.; MENDES, L. M.; RABELO, G. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; BARBOSA, A. M. **Gaseificação de materiais lignocelulósicos para geração de energia elétrica**. *Ciência Florestal*, v. 18, n. 4, p. 525-533, out.-dez., 2008.

ASSIS, P. S.; MARINHO, L. Z. A.; PORTO, F. M. **Utilização do carvão vegetal na siderurgia**. Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 286-288. (publicação técnica)

BAER FILHO, R. **Aspectos econômicos, ambientais e técnicos de três tecnologias para produção de carvão vegetal**. 2008. Monografia (Engenharia Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

BAHR, T.; FRICKE, K.; Hillebrecht, K.; KOLSCH, F.; REINHARD, B. **Clean Development Mechanism - Tratamento de Resíduos Sólidos e Oxidação de Gás Metano para Minimização de Emissões**. 2006.

Disponível em: <http://www.resol.com.br/textos/29-Fricke%20K.pdf> Acesso em: 26 de abril de 2010.

BARCELLOS, D.C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 139f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

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

BRITO, J. O.; BARRICHELLO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2. Densidade da madeira x densidade do carvão. **IPEF**, n. 20, p. 101-113, 1980.

BRITO, J. O.; BARRICHELLO, L. E. G.; SEIXAS, L.; MIGLIORINI, A. J.; MURAMOTO, M. C. Análise da Produção Energética e de Carvão Vegetal de Espécies de Eucalipto. **IPEF**, n. 23, p. 53-56, 1983.

CARMO, J. S. **Propriedades físicas e químicas do carvão vegetal destinado à siderurgia e metalurgia**. 1988. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1988.

CARVALHO JR., J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis, 2007. 176p.

CASTRO, P.F. Obtenção do Alcatrão Vegetal em Fornos de Alvenaria. In: PENEDO, W.R. et al. Eds. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, 1982. p.191-196.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. Ed. São Paulo. Edgard Blucher, 1974. 412p.

CONDE, V. F. **Gases da carbonização da madeira: uma proposta de geração de energia. Projeto de graduação** – Universidade Federal do Espírito Santo. 2006

Disponível em:

>[http://www2.ele.ufes.br/~projgrad/documentos/PG2006\\_1/vitorfragaconde.pdf](http://www2.ele.ufes.br/~projgrad/documentos/PG2006_1/vitorfragaconde.pdf)<.

Acesso em: 14/09/2009

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

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **IPEF**, n.38, p.33-37, 1988.

COUTO, L.; MULLER, M. D.; DIAS, A. N.; TSUKAMOTO, A. de A.; FONSECA, E. M. B. Espécies Cultivadas para Produção de Biomassa para Geração de Energia. **Companhia Energética de Minas Gerais**. Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. 2003.

**Dry-Pyrolysis-Carbonization (DPC)**. Disponível em  
><http://www.dpcbiomassa.com.br/oprocesso.php>< Acesso em 22/10/2009

ECX – European Climate Exchange. **CER Emissions Index**. Disponível em:  
<http://www.ecx.eu/CERemindx>>. Acesso em: 20 de abril de 2010.

FERREIRA, L. H. C. **Desenvolvimento de uma retorta metálica para carbonização da madeira**. 1988. 47p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1988.

FERREIRA, O. C. 2000. **Emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo do carvão vegetal**. In: Economia e Energia. Ano III. Setembro/Outubro. Disponível em: ><http://ecen.com/eee18/enerequi.htm#energiaeq><. Acesso em 05/05/2007.

FERREIRA, W.P.M. **Avaliação de uma fornalha a carvão vegetal para aquecimento de aviário**. 2004. 134f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Eds) **Lignins**. New York: Wiley Interscience, 1971. p. 241-266.

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

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. Qualidade da madeira. In: BORÉM, A. (Ed.). **Biotecnologia florestal**. Viçosa-MG: 2007. p. 25-54.

JUVILLAR, J. B. Tecnologia de Transformação da Madeira em Carvão. In: PENEDO, W.R. et al. Eds. **Uso da Madeira para Fins Energéticos**. Belo Horizonte: Fundo Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, 1982. p.67-82.

LOPES, R.P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto de ar.** 2002. 220f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

MAGALHÃES, E. A. **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa.** 2007. 213f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

MELO, F.A .O. **Projeto, construção e avaliação de uma fornalha para aquecimento de ar utilizando combustíveis particulados finos.** 2003. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

MENDES, A. P. C. S.; CHIAPPETTI, A. A.; REZENDE, L. F. M. Reator de Carbonização de madeira. In: PENEDO, W. R. **Carvão vegetal.** Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 159-164. (publicação técnica)

MEZERETTE, C. & GIRARD, P. 1996. **Environmental Aspects of Gaseous Emissions from Wood Carbonisation and Pyrolysis Processes.** Centre Technique Forestier Tropical, France, 20 p.

NUTEC IBAR Fibras Cerâmicas Ltda. **Folha de dados técnicos - Produto: manta de fibra cerâmica HT,** Poá, São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.nutecibar.com.br/pdf/6003.PDF> . Acesso em: 08 fev.2010.

OLIVEIRA, J.B.de.;VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P.A. Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos. In: PENEDO, W.R. et al. Eds. **Produção e utilização de carvão vegetal.** Belo Horizonte: CETEC, 1982. p.60-73.

OLIVEIRA, E. **Correlação entre parâmetros da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden).** 1988. 47p. (Tese Mestrado)Universidade Federal de Viçosa,Viçosa, MG, 1988.

PLANTAR S/A. **Mecanismo de desenvolvimento limpo formulário do documento de concepção de projeto (mdl-dcp).** 2006. Disponível em : [http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0019/19347.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0019/19347.pdf) Acesso em: 28 de abril de 2010.



PIMENTA, A.S.; BARCELLOS, D.C. **Atualização em carvão vegetal- Apostila.** Viçosa: UFV, 2004. 95p.

RAAD, T. J. (2000). **Instrumentação dos fornos industriais da V & M Florestal.** In:Melhoria contínua da carbonização da madeira. Seminário Interno Vallourec & Mannesmann Tubes. Paraopeba – MG. 32p.

ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT.** 2003, 213p. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – ESALQ, Piracicaba/SP, 2003.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J.S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.* Editado por Roger M. Rowell. Editora Taylor & Francis Group. New York, 2005.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros da qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: **Fórum nacional de carvão vegetal**, 2008, Belo Horizonte. Disponível em: <[painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784](http://painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784)>. Acesso em: 23 de dezembro de 2009.

SILVA, I. D. **Projeto, construção e teste de uma fornalha a carvão vegetal para a secagem de café.** 1998. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1998.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **Preparation of wood for chemical analysis** - Tappi T 264 cm-97. Atlanta: Tappi Press, 1997.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **Acid insoluble lignin wood and pulp** - T222 om-88; Atlanta, 1994-1995.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **Sampling and preparing wood for analysis**, T257 om-85; Atlanta, 1994-1995.

TVINNEREIM, E.; ROINE, K.; HEIMDAL, C.(Eds.) **Carbon 2009 - Emission trading coming home.** Point Carbon, 2009. 48 p. Disponível em: <<http://www.pointcarbon.com/research/carbonmarketresearch/analyst/1.1083366>>. Acesso em: 20 abril de 2010

**U.S. Environmental Protection Agency.** Measurement of Gaseous Organic Compound Emission by Gas Chromatography- Method 18; Code of Federal Regulations, Part 60, Subpart TTT; Government Printing Office: Washington, DC, 1997.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III.** Jerônimo Monteiro-ES: 2008. p. 196-246.

Van ELK, A. G. P. **Mudanças Climáticas, Lixo, Energia.** São Paulo, SP, 2010.

Disponível em:

[http://www.ecosdasardenha.com.br/palestras/palestrantes/05\\_Ana\\_Ghislane\\_Van\\_Elk.pdf](http://www.ecosdasardenha.com.br/palestras/palestrantes/05_Ana_Ghislane_Van_Elk.pdf) . Acesso em: 31 junho 2010.

VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A. Utilização de propagação de ondas sonoras como um método de avaliação mecânica do carvão vegetal. In: **XI Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira.** 2008, Londrina. Disponível em:

[http://www.remade.com.br/br/artigos\\_tecnicos.php?sub=52&categoria=&subcategoria=Carv%E3o%20Vegetal](http://www.remade.com.br/br/artigos_tecnicos.php?sub=52&categoria=&subcategoria=Carv%E3o%20Vegetal) Acesso em: 08/02/2010

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira.** Viçosa: SIF, 1984. 21p. (Boletim técnico, 1).

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmara de combustão.** Editora da UFPR, Curitiba, 2001. 185p.

## ANEXO

Tabela 1 – ANOVA do parâmetro teor de umidade.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	1,1665220	1,1665220	0,383	n/s
Resíduo	10	30,4455000	3,0445500		
cv=47,206					

Tabela 2 – ANOVA do parâmetro densidade relativa aparente.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	0,4437105	0,4437105	5,929	n/s
Resíduo	10	0,7483660	0,7483660		
cv=1,963					

Tabela 3 – ANOVA do parâmetro densidade à granel.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	21,574010	21,574010	0,926	n/s
Resíduo	10	232,93370	23,29337		
cv=2,2					

Tabela 4 – ANOVA do parâmetro friabilidade.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	9,668313	9,668313	3,318	significativo
Resíduo	10	29,142370	2,914237		
cv=9,864					

Tabela 5 – ANOVA do parâmetro poder calorífico.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf

Amostra	1	214803,90	214803,90	20,597	significativo
Resíduo	10	104290,30	10429,03		
cv=1,310					

Tabela 6 – ANOVA de teor de cinzas.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	0,4575204	0,4575204	0,793	n/s
Resíduo	10	0,5772669	0,5772669		
cv=10,306					

Tabela 7 – ANOVA de teor de materiais voláteis.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	153,378500	153,378500	115,448	significativo
Resíduo	10	13,285510	1,328551		
cv=5,692					

Tabela 8 – ANOVA de teor de carbono fixo.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	151,7077	151,7077	117,307	significativo
Resíduo	10	12,9326	1,2933		
cv=1,493					

Tabela 9 – ANOVA de rendimento em carvão vegetal.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	0,907500	0,907500	0,424	n/s
Resíduo	10	21,39500	2,139500		
cv=5,146					

Tabela 10 – ANOVA de rendimento em tiço.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	244,80330	244,80330	262,289	significativo
Resíduo	10	9,333330	9,333330		
cv=12,101					

Tabela 11 – ANOVA de rendimento em finos.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	3,30750	3,30750	2,63	significativo
Resíduo	10	12,5750	12,5750		
cv=29,706					

Tabela 12 – ANOVA da vazão na chaminé.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	5314327,00000	5314327,00000	79,094	significativo
Resíduo	24	1612563,0000	67190,1400		
cv= 7,935					

Tabela 13 – ANOVA da temperatura na chaminé.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	1373997,00000	1373997,00000	340,596	significativo
Resíduo	24	96818,3600	4034,0990		
cv= 22,279					

Tabela 14 – ANOVA do teor de umidade dos gases.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	271,38460	271,38460	41,958	significativo
Resíduo	24	155,2308	6,4679		
cv= 14,760					

Tabela 15 – ANOVA de metano.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	0,50123	0,50123	39,966	significativo
Resíduo	24	0,3010	0,1254		
cv= 72,612					

Tabela 16 – ANOVA de monóxido de carbono.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	9,55662	9,55662	51,772	significativo
Resíduo	24	4,4302	0,1846		
cv= 56,770					

Tabela 17 – ANOVA de dióxido de carbono.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	30,86880	30,86880	9,217	significativo
Resíduo	24	80,3829	3,3493		
cv= 35,176					

Tabela 18 – ANOVA de nitrogênio.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	33,58471	33,58471	84,05	significativo
Resíduo	24	9,5899	0,3996		
cv= 0,806					

Tabela 19 – ANOVA de oxigênio.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	56,71385	56,71385	15,257	significativo
Resíduo	24	89,2108	3,7171		
cv= 12,482					

Tabela 20 – ANOVA de poder calorífico do gases da carbonização.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	6907,61400	6907,61400	41,414	significativo
Resíduo	24	4003,0320	166,7930		
cv= 75,128					

Tabela 21 – ANOVA de material particulado dos gases da carbonização.

FV	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	signf
Amostra	1	0,14707	0,14707	158,191	significativo
Resíduo	24	2231300,0000	9297,8300		
cv= 36,570					

Tabela 22 – Materiais e custos para construção da fornalha e chaminé.

Material	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Total (R\$)
Tijolo Prensado	3250	Unidade	0,18	585,00
Areia Média Lavada	1	m <sup>3</sup>	60,00	60,00
Brita Média	1	m <sup>3</sup>	100,00	100,00
Cimento CII	3	saco	17,00	51,00
Vergalhão 5,0 mm	3	barra	8,53	25,59
Vergalhão 4,0 mm	3	barra	5,50	16,50
Cola Branca	4	Unidade	13,65	54,60
Açúcar Cristal	20	kg	1,26	25,20
Terra de Barranco Horizonte B	1	m <sup>3</sup>	20,00	20,00
Arame recozido	1	Kg	5,80	5,80
Prego	1	Kg	5,12	5,12
Serrinha Metálica	2	Unidade	4,00	8,00
Chapa metálica 50 cm x 55 cm	1	Unidade	25,00	25,00
Transporte e Frete	2	Unidade	40,00	80,00
Manta cerâmica	16	m <sup>2</sup>	43,00	688,00
Chapa metálica galvanizada	2	Unidade	35,00	70,00

TOTAL (R\$)				1819,81
-------------	--	--	--	---------

Tabela 23 – Materiais gastos na construção do forno

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Total (R\$)</b>
Tijolo Prensado	3000	Unidade	0,18	540,00
Areia Média Lavada	4	m <sup>3</sup>	60,00	240,00
Brita Média	1,5	m <sup>3</sup>	100,00	150,00
Cimento CII	14	saco	17,00	238,00
Vergalhão 10mm (3/8)	15	barra	27,00	405,00
Vergalhão 4,0 mm (4.2)	10	barra	5,50	55,00
Açúcar Cristal	25	Kg	1,26	31,15
Arame recozido	1	Kg	5,80	5,80
Prego	1	Kg	5,12	5,12
Pedra de mão	1	m <sup>3</sup>	80,00	80,00
Tábua	6,48	m <sup>2</sup>	11,00	71,28
<b>TOTAL (R\$)</b>				1821,17

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 94 206-101**

**Cliente:** Geovaliar Análises e Consultorias Ambientais Ltda.  
Rua Córdoba, 161  
32340-310 - B. Santa Cruz Industrial - Contagem - MG

**Material:** Tubo de Pitot S

**Referência:** Cotação CMF-3832/09 aprovada via pedido de compra RQ-08 datado de 13.03.2009.

**1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL**

Tipo	Tubo de Pitot S
Fabricante	não consta
Modelo	Comprimento 2300 mm
Número de identificação	não consta
Faixas de operação	não consta
Valor de uma divisão	não consta

**2 PADRÕES UTILIZADOS**

Tubo de Pitot do tipo estático AP-01 em conjunto com micromanômetro PC-10. Certificados de calibração das barras padrões números 62 367-101 e 62 368-101 de 15 e 16.02.2005, rastreados à RBC. Recalibração a cada 5 anos

Manômetro de coluna de líquido PC-07. Certificado de calibração número 84 082-101 de 03.01.2008, rastreado à RBC. Recalibração a cada 3 anos

Sensores de temperatura TR-84 e TR-92, tipo PT-100. Certificados de calibração, números 79 040-101 e 79 039-101, respectivamente, de 10.05.2007, rastreados à RBC. Sensores acoplados ao indicador de temperatura TI-33. Recalibração a cada 2 anos

Sensor de temperatura TR-164, tipo PT-100, conectado a indicador de temperatura TI-64, com calibração interna rastreada a padrões RBC. Data da calibração: 27.01.2009 e com recalibração a cada 2 anos

Medidor de pressão atmosférica PA-12. Certificado de calibração, número 44 952 de 10.03.2006, rastreado a padrões do NIST e PTB com acreditação no A2LA. Recalibração a cada 5 anos

**3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO**

CMF-LV-PC-18 - Procedimento para calibração de tubos de Pitot em linha de vento - Versão 01, Revisão 01, agosto de 2007



Os resultados apresentados neste documento têm validade somente em relação ao sistema de medição utilizado e não podem ser utilizados para fins diferentes dos previstos. Este documento não se aplica ao uso de outros ou de outros IPT. Para qualquer dúvida, por favor, consulte o responsável pelo sistema de medição.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT  
Av. Prof. Almeida Prado, 122 - Cidade Universitária - Butantã - São Paulo - SP - CEP 05508-900 - www.ipt.br  
Bairro: Morumbi - Contagem - SAC - Tel: (51) 2017-4126 - 0800-888888 e 0800-011666 - Fax: (11) 3765-4002

Figura 1 – Certificado de calibração tubo Pitot “s”



4 RESULTADOS

Tabela 1 - Resultados da calibração.

Lado A			Lado B		
Re/L (m <sup>1</sup> )	V <sub>padrão</sub> (m s <sup>-1</sup> )	C (-)	Re/L (m <sup>1</sup> )	V <sub>padrão</sub> (m s <sup>-1</sup> )	C (-)
0,35 × 10 <sup>0</sup>	6,2	0,887	0,38 × 10 <sup>0</sup>	6,5	0,931
0,57 × 10 <sup>0</sup>	9,8	0,880	0,57 × 10 <sup>0</sup>	9,9	0,889
0,87 × 10 <sup>0</sup>	15,1	0,884	0,86 × 10 <sup>0</sup>	14,9	0,874
1,16 × 10 <sup>0</sup>	20,1	0,885	1,15 × 10 <sup>0</sup>	20,0	0,881
1,33 × 10 <sup>0</sup>	23,1	0,882	1,33 × 10 <sup>0</sup>	23,2	0,884
1,44 × 10 <sup>0</sup>	25,1	0,883	1,44 × 10 <sup>0</sup>	25,1	0,885
1,57 × 10 <sup>0</sup>	27,4	0,885	1,57 × 10 <sup>0</sup>	27,3	0,884
1,73 × 10 <sup>0</sup>	30,3	0,883	1,74 × 10 <sup>0</sup>	30,4	0,885
1,85 × 10 <sup>0</sup>	32,5	0,883	1,87 × 10 <sup>0</sup>	32,7	0,890
2,02 × 10 <sup>0</sup>	35,5	0,882	2,04 × 10 <sup>0</sup>	35,6	0,886

Os tubos de Pitot S foram calibrados em conjunto com as sondas coletoras de particulado, pois esta é a configuração utilizada nas medições.

O coeficiente de calibração C médio é:

$$\begin{aligned} \text{Lado A: } C &= 0,883 \pm 0,008 & p/ & 0,57 \times 10^0 \leq \text{Re/L} \leq 2,02 \times 10^0 \\ \text{Lado B: } C &= 0,884 \pm 0,012 & p/ & 0,57 \times 10^0 \leq \text{Re/L} \leq 2,04 \times 10^0 \end{aligned}$$

Incerteza

As incertezas expandidas relatadas estão baseadas em suas respectivas incertezas padrão combinadas, multiplicadas por um fator de abrangência k = 1,96, considerando uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 %.

5 NOTAS

Os resultados da calibração apresentados na Tabela 1, estão referidos à pressão atmosférica, temperatura e massa específica médias de 94,00 kPa, 21,7 °C e 1,089 kg/m<sup>3</sup>.

No Anexo A são mostrados o esquema do tubo de Pitot S indicando os lados A e B, descritos na Tabela 1, e as equações para o cálculo do coeficiente de calibração C e para o cálculo da velocidade do escoamento.

6 ANEXOS

Anexo A - Informações Gerais (1 página).

Data da execução da calibração: 28.04.2009

São Paulo, 29 de abril de 2009.

CENTRO DE METROLOGIA DE FLUIDOS  
Laboratório de Vazão  
  
Gilder Neder  
Físico  
Supervisor da Calibração  
R.E. n° 8 465

CENTRO DE METROLOGIA DE FLUIDOS  
Laboratório de Vazão  
  
Nilson Maesani Taira  
Engenheiro Mecânico  
Responsável pelo Laboratório  
CREA n° 601.861.565 R.E. n° 7438.4

Os resultados apresentados neste documento têm validade metrológica e os dados fornecidos são válidos somente no contexto. Calibração não é devolvida ao cliente sob pena de ser marca IPT, para qualquer fim, sob pena de nulidade.  
A reprodução deste documento sem permissão do IPT, configurará, sem nenhuma exceção.

Figura 2 – Calibração do tubo Pitot “s”

**ANEXO A - INFORMAÇÕES GERAIS**

A calibração do tubo de Pitot S é realizada para determinação do coeficiente de calibração C, calculado a partir da Eq (A1):

$$C = \frac{V_{\text{padrão}}}{V_{\text{teste}}} \quad \text{Eq (A1)}$$

A velocidade do fluido V é determinada a partir de:

$$V = C \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad \text{Eq (A2)}$$

onde:

- $V_{\text{padrão}}$  : velocidade do ar obtida em laboratório com o tubo de Pitot padrão (em  $m \cdot s^{-1}$ );
- $V_{\text{teste}}$  : velocidade do ar obtida em laboratório com o tubo de Pitot S (em  $m \cdot s^{-1}$ );
- $\Delta P$  : diferencial de pressão gerado pelo fluido no tubo de Pitot S (em Pa);
- $\rho$  : massa específica do fluido em escoamento (em  $kg \cdot m^{-3}$ ).

A definição dos lados A e B do tubo de Pitot S está em acordo com esquema indicado na Figura A1, na qual, as tomadas de pressão são a referência.

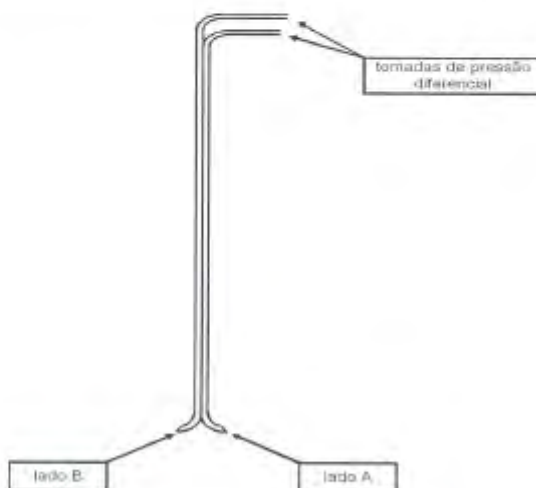


Figura A1. Tubo de Pitot S.

Os resultados apresentados neste documento têm validade restrita e se aplicam somente ao item referido no certificado. Este documento não deve ser usado de forma ou de outra IPT, para qualquer fim, sob pena de responsabilização. A reprodução deste documento em qualquer forma ou por qualquer meio é expressamente proibida sem a devida autorização.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT  
Av. Heliópolis, nº 572 - Cidade Universitária - Osasco - 06068-900 - São Paulo - SP - Tel: (11) 3911-4000 - www.ipt.br  
Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC - Tel: (11) 3911-4100, 3911-4000 e 3911-4144 - Fax: (11) 3911-4002 - atc@ipt.br

Figura 3 – Anexo do certificado de calibração do tubo Pitot “s”

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 94 207-101**

Cliente: Geovaliar Análises e Consultorias Ambientais Ltda.  
Rua Córdoba, 161  
32340-310 - B. Santa Cruz Industrial - Contagem - MG

Material: Tubo de Pitot S

Referência: Cotação CMF-3832/09 aprovada via pedido de compra RQ-08 datado de 13.03.2009.

**1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL**

Tipo	: Tubo de Pitot S
Fabricante	: não consta
Modelo	: Comprimento 1500 mm
Número de identificação	: não consta
Faixas de operação	: não consta
Valor de uma divisão	: não consta

**2 PADRÕES UTILIZADOS**

Tubo de Pitot do tipo estático AP-01 em conjunto com micromanômetro PC-10. Certificados de calibração das barras padrões números 62 367-101 e 62 368-101 de 15 e 16.02.2005, rastreados à RBC. Recalibração a cada 5 anos.

Manômetro de coluna de líquido PC-06. Certificado de calibração número 89 919-101 de 02.10.2008, rastreado à RBC. Recalibração a cada 3 anos.

Sensores de temperatura TR-84 e TR-92, tipo PT-100. Certificados de calibração, números 79 040-101 e 79 038-101, respectivamente, de 10.05.2007, rastreados à RBC. Sensores acoplados ao indicador de temperatura TI-33. Recalibração a cada 2 anos.

Sensor de temperatura TR-164, tipo PT-100, conectado a indicador de temperatura TI-64, com calibração interna rastreada a padrões RBC. Data da calibração: 27.01.2009 e com recalibração a cada 2 anos.

Medidor de pressão atmosférica PA-12. Certificado de calibração, número 44 952 de 10.03.2006, rastreado a padrões do NIST e PTB com acreditação no A2LA. Recalibração a cada 5 anos.

**3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO**

CMF-LV-PC-16 - Procedimento para calibração de tubos de Pitot em túnel de vento - Versão 01, Revisão 01, agosto de 2007.

Figura 4 - Certificado de calibração do tubo Pitot “s”

4 RESULTADOS

Tabela 1 - Resultados da calibração.

Lado A			Lado B		
Re/L (m <sup>-1</sup> )	V <sub>padrão</sub> (m.s <sup>-1</sup> )	C (-)	Re/L (m <sup>-1</sup> )	V <sub>padrão</sub> (m.s <sup>-1</sup> )	C (-)
0,36 x 10 <sup>5</sup>	6,2	0,835	0,38 x 10 <sup>5</sup>	6,5	0,845
0,57 x 10 <sup>5</sup>	9,8	0,814	0,57 x 10 <sup>5</sup>	9,9	0,823
0,87 x 10 <sup>5</sup>	15,1	0,829	0,85 x 10 <sup>5</sup>	14,9	0,831
1,16 x 10 <sup>5</sup>	20,1	0,833	1,15 x 10 <sup>5</sup>	20,0	0,829
1,33 x 10 <sup>5</sup>	23,1	0,834	1,33 x 10 <sup>5</sup>	23,2	0,834
1,44 x 10 <sup>5</sup>	25,1	0,837	1,44 x 10 <sup>5</sup>	25,1	0,838
1,57 x 10 <sup>5</sup>	27,4	0,838	1,57 x 10 <sup>5</sup>	27,3	0,836
1,73 x 10 <sup>5</sup>	30,3	0,837	1,74 x 10 <sup>5</sup>	30,4	0,839
1,85 x 10 <sup>5</sup>	32,5	0,839	1,87 x 10 <sup>5</sup>	32,7	0,844
2,02 x 10 <sup>5</sup>	35,5	0,841	2,04 x 10 <sup>5</sup>	35,6	0,842

Os tubos de Pitot S foram calibrados em conjunto com as sondas coletoras de particulado, pois esta é a configuração utilizada nas medições.

O coeficiente de calibração C médio é:

Lado A: C = 0,836 ± 0,011 p/ 0,57 x 10<sup>5</sup> ≤ Re/L ≤ 2,02 x 10<sup>5</sup>  
Lado B: C = 0,837 ± 0,013 p/ 0,57 x 10<sup>5</sup> ≤ Re/L ≤ 2,04 x 10<sup>5</sup>

**Incerteza**

As incertezas expandidas relatadas estão baseadas em suas respectivas incertezas padrão combinadas, multiplicadas por um fator de abrangência k = 1,96, considerando uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 %.

5 NOTAS

Os resultados da calibração apresentados na Tabela 1, estão referidos à pressão atmosférica, temperatura e massa específica médias de 94,00 kPa, 21,7 °C e 1,089 kg/m<sup>3</sup>.

No Anexo A são mostrados o esquema do tubo de Pitot S indicando os lados A e B, descritos na Tabela 1, e as equações para o cálculo do coeficiente de calibração C e para o cálculo da velocidade do escoamento.

6 ANEXOS

Anexo A - Informações Gerais (1 página).

Data da execução da calibração: 28.04.2009

São Paulo, 29 de abril de 2009.

CENTRO DE METROLOGIA DE FLUIDOS  
Laboratório de Vazão  
  
Gilder Nader  
Físico  
Supervisor da Calibração  
R.E. nº 8 465

CENTRO DE METROLOGIA DE FLUIDOS  
Laboratório de Vazão  
  
Nilson Massami Taira  
Engenheiro Mecânico  
Responsável pelo Laboratório  
CREA nº 601.361.555 R.E. nº 7858-4

Os resultados apresentados neste documento são válidos somente para o sistema de medição aqui descrito. Este documento não se aplica para outros sistemas de medição. Este documento não substitui a documentação de referência. Este documento não substitui a documentação de referência.

Figura 5 – Calibração do tubo Pitot ”s”

**ANEXO A - INFORMAÇÕES GERAIS**

A calibração do tubo de Pitot S é realizada para determinação do coeficiente de calibração C, calculado a partir da Eq (A1):

$$C = \frac{V_{\text{padrão}}}{V_{\text{teste}}} \quad \text{Eq (A1)}$$

A velocidade do fluido V é determinada a partir de:

$$v = C \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad \text{Eq (A2)}$$

onde:

- $V_{\text{padrão}}$  : velocidade do ar obtida em laboratório com o tubo de Pitot padrão (em m.s<sup>-1</sup>);
- $V_{\text{teste}}$  : velocidade do ar obtida em laboratório com o tubo de Pitot S (em m.s<sup>-1</sup>);
- $\Delta P$  : diferencial de pressão gerado pelo fluido no tubo de Pitot S (em Pa);
- $\rho$  : massa específica do fluido em escoamento (em kg.m<sup>-3</sup>).

A definição dos lados A e B do tubo de Pitot S está em acordo com esquema indicado na Figura A1, na qual, as tomadas de pressão são a referência.

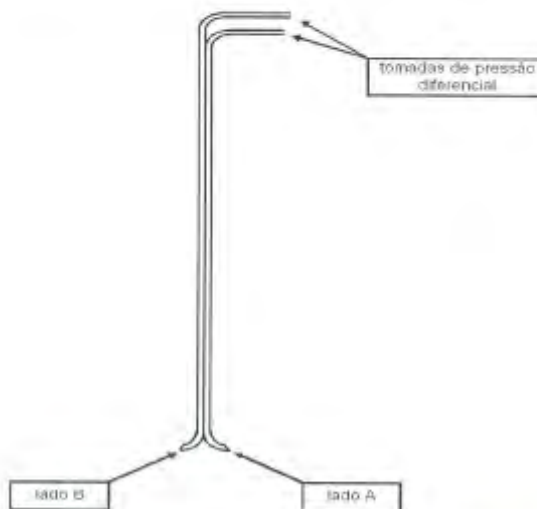


Figura A1. Tubo de Pitot S.

Figura 6 – Anexo do certificado de calibração do tubo Pitot “s”





Certificado de Calibração n°: 12410/1 R1 Pag.: 01/02

**DADOS DO CLIENTE**

CONTRATANTE: **Inovação Teste e Medição Ltda.**  
ENDEREÇO: Rua Sumara, 279, Novo Eldorado, Contagem - MG  
CLIENTE: **Ambtech Serviços Especialis Ltda**

**DADOS DO INSTRUMENTO**

INSTRUMENTO: Analisador de Gases IDENTIFICAÇÃO: 0632 2302  
MARCA: Testo N° SÉRIE: 01078104/504  
MODELO: Testo 330-2

**DADOS DAS CALIBRAÇÕES**

DATA DA CALIBRAÇÃO: 12/08/09 DATA DE EMISSÃO: 12/08/09  
ORDEN DE SERVIÇO N°: 12410 CONDIÇÕES AMBIENTAIS: Temperatura: 23 ± 5°C e Umidade: 50 ± 20%r.  
LOCAL DA CALIBRAÇÃO: Laboratório da Testo

**DADOS DO PROCEDIMENTO**

O analisador foi calibrado realizando seis leituras em cada gás de referência e expressa a média como resultado de cada ponto.  
Procedimento interno: PO - 5.4-001 revisado 0

**DADOS DOS PADRÕES**

Código	Descrição	Data Calibração	N° do Certificado	Laboratório	Validado	Restreabilidade
Padrão 11 - CO	Gás referência CO 140 ppm	27/07/09	1779/09	Linde Gases	Jul-11	RBC
Padrão 12 - CO	Gás referência CO 1930 ppm	06/08/09	2327/08	Linde Gases	ago-09	RBC
Padrão 13 - NO	Gás referência NO 690 ppm	14/07/07	1899/07	Linde Gases	Jul-10	RBC
Padrão 12 - SO2	Gás referência SO2 1900 ppm	06/08/09	2327/08	Linde Gases	ago-10	RBC
Padrão 11 - CO2	Gás referência CO2 1400 ppm	27/07/09	1779/09	Linde Gases	Jul-11	RBC
Padrão 12 - CO2	Gás referência CO2 8600 ppm	06/08/09	2327/08	Linde Gases	ago-09	RBC
Padrão 11 - O2	Gás referência O2 2,70%	27/07/09	1779/09	Linde Gases	Jul-11	RBC
Padrão 12 - O2	Gás referência O2 10,3%	06/08/09	2327/08	Linde Gases	ago-09	RBC

**RESULTADOS**

Tipo do gás: Monóxido Carbono		DESVIO ENCONTRADO	INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO		UNIDADE LEITURA
VALOR DE REFERENCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO		VALOR	FACTOR K	
1014	987	-27	11	2,00	ppm

Testo do Brasil - Instrumentos de Medição Ltda.

Rua Dr. Guilherme da Silva, 190 - Cambuí - CEP 13015-028 - Campinas - SP - Brasil  
PABX: 19 3731-5800 - Fax: 19 3731-5819 - E-mail: calibracao@testo.com.br - http://www.testo.com.br

Figura 7 – Certificado de calibração do analisador de gases, página 1



Certificado de Calibração nº: 12410/1 R1 Pag.: 02/02

**RESULTADOS - CONTINUAÇÃO**

Tipo do gás:		Origênio		INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO		UNIDADE LEITURA
VALOR DE REFERENCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO	DESVIO ENCONTRADO	VALOR	FATOR K		
2,59	2,8	0,1	0,1	2,00	%	

Tipo do gás:		Oxido Nitrico		INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO		UNIDADE LEITURA
VALOR DE REFERENCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO	DESVIO ENCONTRADO	VALOR	FATOR K		
852	801	-1	5	2,00	ppm	

**OBSERVAÇÕES**

- 1 - Desvio encontrado = Leitura no instrumento - leitura de referência.
- 2 - A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência k, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.
- 3 - O próximo certificado refere-se exclusivamente ao instrumento calibrado.
- 4 - É proibida a reprodução parcial deste certificado, sem prévia autorização.
- 5 - Este certificado é a segunda via do certificado nº 12410/1.

Técnico Executante: Jaime Macherini

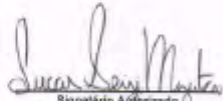
  
 Signatário Autorizado  
 Lucas Solji Mizuta

Figura 8 – Certificado de calibração do analisador de gases, página 2

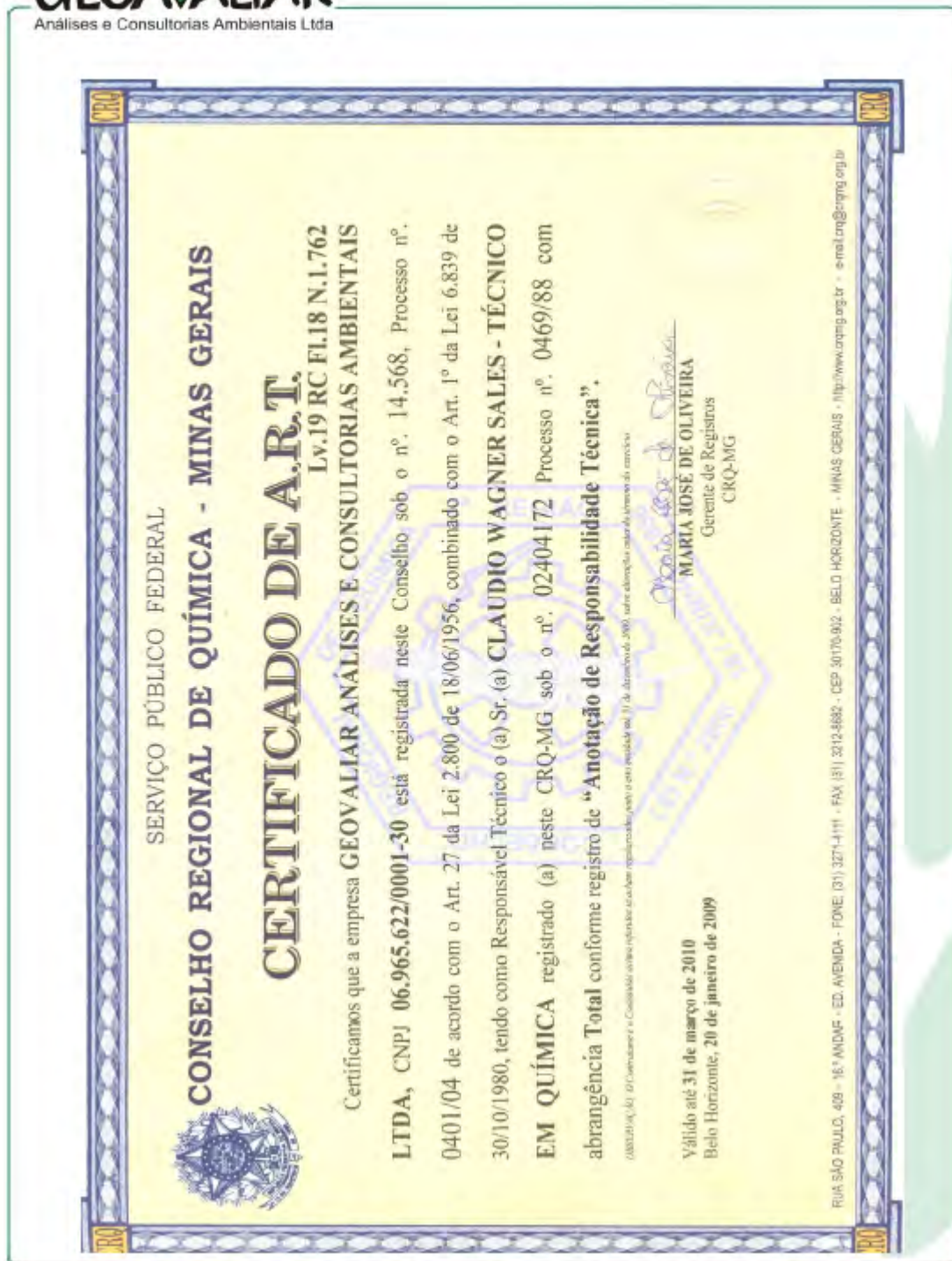


Figura 9 – Certificado de A.R.T. da Geoavaliar



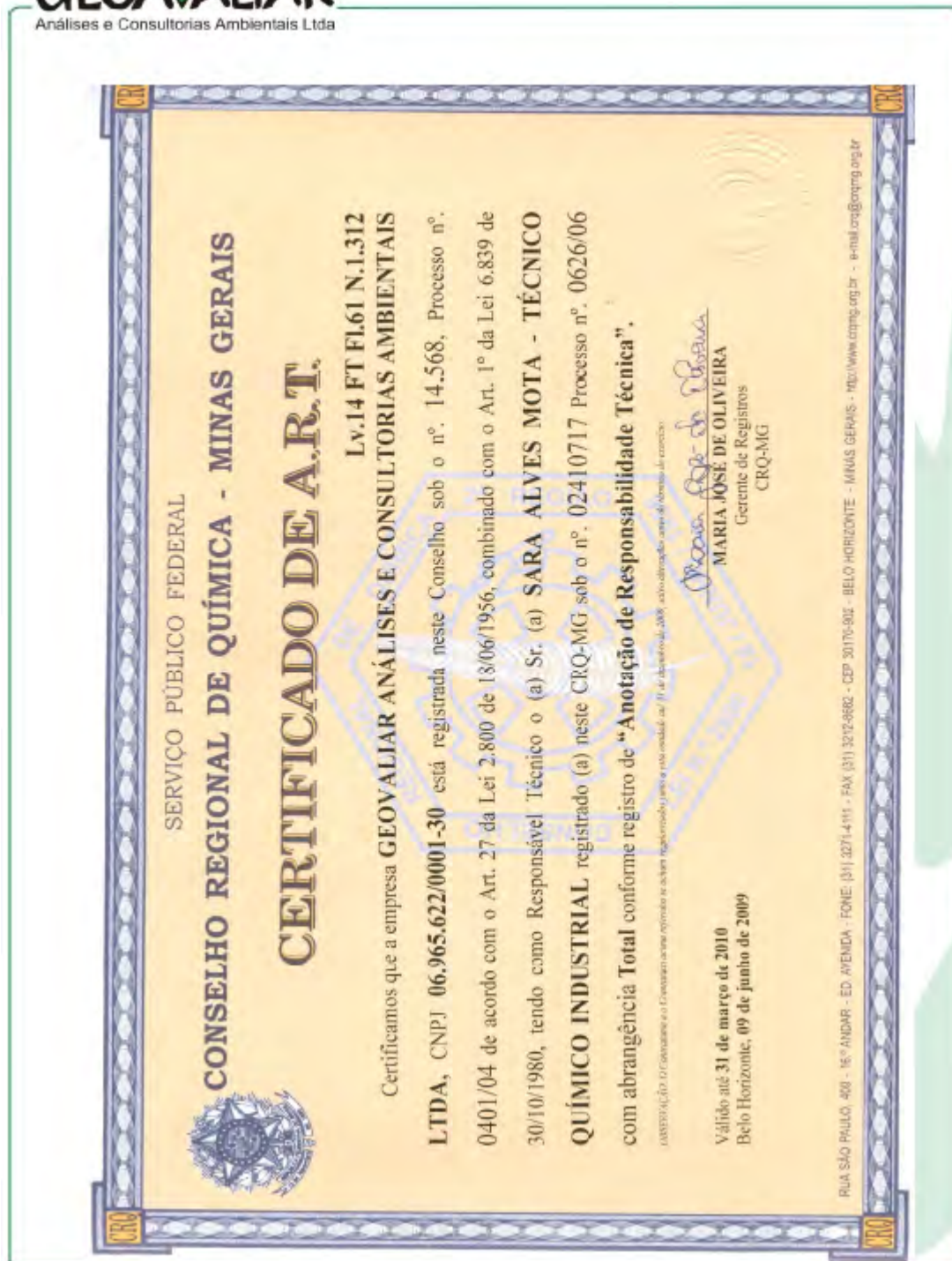


Figura 10 – Certificado de A.R.T. da Geoavaliar