

AYLSON COSTA OLIVEIRA

**SISTEMA FORNO-FORNALHA PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO  
VEGETAL**

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  
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48s  
2012  
Oliveira, Aylson Costa, 1986-  
Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal /  
Aylson Costa Oliveira. – Viçosa, MG, 2012.  
viii, 64f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexo.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 50-55

1. Carvão vegetal. 2. Carbonização. 3. Fornos. 4. Queima  
de gás. 5. Gases - Combustão. I. Universidade Federal de  
Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.98675

AYLSON COSTA OLIVEIRA

**SISTEMA FORNO-FORNALHA PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO  
VEGETAL**

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: 13 de fevereiro de 2012.

---

Benedito Rocha Vital  
(Coorientador)

---

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho  
(Coorientadora)

---

Paulo Fernando Trugilho

---

Daniel Câmara Barcellos

---

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro  
(Orientadora)

*A Babi e Bernardo por toda força e amor  
dedicados a mim!*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as benções recebidas.

À Universidade Federal de Viçosa, pela formação acadêmica e oportunidade de cursar a pós-graduação.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado.

À FAPEMIG, pelo financiamento da pesquisa.

À SECTES – Polo de Excelência em Florestas, pelo financiamento da pesquisa.

À ASIFLOR, pela doação dos materiais e da mão de obra para realização da pesquisa.

À minha amada Bárbara e ao nosso filho Bernardo, por todo amor, compreensão, ajuda e momentos de alegria.

Aos meus pais, Olício e Creusa; aos meus irmãos, Álisson, Adriene e Aline; ao meu cunhado, Waldemir; e ao meu afilhado, Luiz Otávio, por todo carinho, amor e apoio.

Ao engenheiro florestal João Câncio de Andrade, pelo incentivo ao experimento.

Ao grupo de pesquisa em carvão vegetal - G6, pelo incentivo ao experimento.

À professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, pela amizade, pelo respeito, pela confiança e pelas oportunidades.

Aos professores Benedito Rocha Vital e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, pela orientação, pela amizade e pelo apoio.

Aos professores Paulo Fernando Trugilho e Daniel Câmara Barcellos, pelas contribuições.

Aos amigos Sálvio, Renato, Bráulio, Danilo, Bruno César, Fábio, Júlia, Marco Túlio e Diego, pela ajuda imprescindível durante todo desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos do LAPEM, LPM e LASF e a todos que contribuíram para a realização desta pesquisa.

## **BIOGRAFIA**

AYLSON COSTA OLIVEIRA, filho de Olício Evaristo de Oliveira e de Creusa de Melo Costa Oliveira, nasceu em 30 de setembro de 1986, na cidade de João Monlevade, estado de Minas Gerais.

Em 2005, ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em janeiro de 2010.

Em março de 2010, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa, em nível de Mestrado, na área de Tecnologia da Madeira.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS .....	3
2.1 Objetivo geral .....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1 Contexto energético.....	4
3.2 Aspectos teóricos da degradação térmica da madeira .....	6
3.3 Processo de carbonização da madeira .....	8
3.4 Fornos de alvenaria para produção de carvão vegetal.....	11
3.4.1 Forno “rabo quente” .....	12
3.4.2 Forno de encosta .....	12
3.4.3 Forno de superfície.....	13
3.4.4 Forno retangular .....	14
3.4.5 Forno MF1-UFV .....	15
3.5 Fornalhas para combustão dos gases da carbonização .....	16
3.6 Controle da carbonização via sensores de temperatura.....	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
4.1 Projeto e construção do sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal .....	21
4.1.1 Construção do forno .....	23
4.1.2 Construção da fornalha, ductos de condução dos gases e chaminé .....	23
4.2 Instalação dos cilindros metálicos .....	25
4.3 Propriedades da madeira .....	26
4.4 Funcionamento do sistema forno-fornalha.....	27
4.4.1 Carregamento do forno .....	28
4.4.2 Ignição e controle da carbonização .....	28
4.4.3 Combustão dos gases da carbonização na fornalha .....	29

4.4.4	Resfriamento do forno.....	29
4.4.5	Abertura e descarregamento do forno .....	30
4.5	Rendimento gravimétrico da carbonização .....	30
4.6	Amostragem e propriedades do carvão vegetal.....	31
4.7	Perfil térmico .....	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1	Propriedades da madeira .....	33
5.2	Faixas teóricas de carbonização .....	34
5.3	Perfil térmico do forno .....	37
5.4	Eficiência da fornalha.....	40
5.5	Rendimento gravimétrico das carbonizações .....	42
5.6	Propriedades do carvão vegetal .....	44
6	CONCLUSÕES .....	48
7	RECOMENDAÇÕES.....	49
8	REFERÊNCIAS.....	50
	ANEXOS .....	56

## RESUMO

OLIVEIRA, Aylson Costa, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012, **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientadores: Benedito Rocha Vital e Ana Márcia Macedo L. Carvalho.

A qualidade do carvão vegetal depende da madeira utilizada na carbonização e da tecnologia de conversão. Embora nos últimos anos diversas pesquisas tenham sido desenvolvidas com o intuito de melhorar os índices de qualidade da madeira, grande parte da produção brasileira de carvão ainda ocorre em fornos com baixo rendimento gravimétrico e com emissões de gases, o que polui o ambiente. Na tentativa de alterar esse cenário, desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de avaliar o funcionamento de um sistema forno-fornalha com baixa emissão de poluentes, maximizando o rendimento em carvão vegetal. Inicialmente foram construídos três fornos de alvenaria com capacidade de enforamento de 12 st (9 m<sup>3</sup>) de madeira, acoplados a uma fornalha para queima dos gases gerados durante a carbonização. Foram realizadas quatro carbonizações, utilizando madeira de *Eucalyptus* spp., tendo sido determinados os rendimentos gravimétricos, a qualidade do carvão vegetal e a eficiência da fornalha. O controle da carbonização foi realizado com o uso da temperatura interna, mensurada por meio de sensor infravermelho de temperatura. De acordo com os resultados, o sistema forno-fornalha apresentou rendimento médio de 33% de carvão, 8% de atíço e 3% de finos por carbonização. O carvão apresentou características adequadas para uso industrial e doméstico, principalmente em relação ao teor de carbono fixo e poder calorífico superior. A fornalha mostrou-se eficiente na redução de emissão de gases para o ambiente, funcionando durante um terço do tempo de carbonização. Conclui-se que o sistema forno-fornalha avaliado apresenta facilidade de construção, baixo custo e produção de carvão vegetal superior a 30%, com índices satisfatórios de qualidade, podendo ser difundido entre os produtores de carvão vegetal.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Aylson Costa, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012, **Kiln-furnace system for charcoal production**. Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-advisors: Benedito Rocha Vital and Ana Márcia Macedo L. Carvalho.

The quality of charcoal depends on the wood and technology conversion. Although several studies were developed seeking to improve the quality of wood, much of the Brazilian production of charcoal still occurs in kilns with low yield and emissions, polluting the environment. In order to change this scenario, the objective of this study was to evaluate the functioning of a kiln-furnace system with low emission of pollutants and maximization of charcoal yield. Three kilns were built, attached to a furnace for burning the gases generated during the carbonization. The capacity of each oven was 9m<sup>3</sup>. Subsequently, four carbonizations were performed using *Eucalyptus* wood. The charcoal yields, quality of charcoal and furnace efficiency were determined. The control of the carbonization is performed by measuring the temperature inside the kiln, with the aid of an infrared temperature sensor. The average production of charcoal was 33% in the kiln-furnace system, higher than usually found for the main kilns used in the conversion of wood into charcoal. The yields of semi-carbonized wood were less than 8%. Charcoal presented fixed carbon content exceeding 80%, calorific power equal 8000 kcal.kg<sup>-1</sup> and had low sensitivity of generation of fines (particle size less than 12.7 mm) during its handling, suitable characteristics for industrial and domestic uses. Furnace was effective in reducing greenhouse gas emissions, working for a third of carbonization. It follows that the evaluated kiln-furnace system presented easy construction, low cost, and a high charcoal yield with good indicators of quality, which may be diffused among the producers of charcoal.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética nos últimos anos, associada ao aumento do preço do petróleo, à preocupação ambiental e à necessidade de preservação dos fragmentos florestais restantes, exige que qualquer cadeia produtiva que utiliza recursos naturais busque não somente a ampliação, mas principalmente maior eficiência durante a exploração ou produção, para garantir o suprimento energético aliado à manutenção da qualidade dos recursos naturais.

Para se adequar a essa realidade têm-se buscado, na cadeia produtiva de carvão vegetal, a modernização e a melhoria da tecnologia empregada na conversão da madeira em carvão, como também substituir a matéria-prima oriunda da mata nativa por madeira do gênero *Eucalyptus* obtida em florestas plantadas, alcançando, assim, maior qualidade e homogeneidade do produto.

No Brasil o carvão vegetal destina-se quase que exclusivamente ao setor siderúrgico, para redução do minério de ferro e produção de ferro-gusa, aço e ferro-liga. Um porcentual menor é destinado à indústria cimenteira e ceramista, ao uso comercial em churrasqueiras e padarias, além do uso residencial para cocção de alimentos e aquecimento.

O estado de Minas Gerais detém o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo, destacando-se como o maior produtor e consumidor desse insumo energético. As indústrias produtoras e consumidoras de carvão e o governo de Minas Gerais, buscando alternativas para minimizar os impactos gerados pela produção de carvão vegetal e assegurar a competitividade perante o carvão mineral, alinharam-se para a criação do Pacto da Sustentabilidade. O pacto propõe a criação de mecanismos para eliminar a supressão da vegetação nativa e reforça a proteção da biodiversidade e dos recursos hídricos e a conservação dos solos, prevendo a redução gradual do consumo de produtos provenientes de matas nativas pelas empresas. Portanto, a partir de 2018, toda madeira necessária para carvoejamento deverá ser originada de florestas plantadas.

O rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal são influenciados pelas propriedades da madeira e pela tecnologia empregada no processo de carbonização. No que se refere à madeira, a implantação de florestas plantadas e a seleção de espécies de eucalipto possibilitaram a redução na variabilidade das propriedades da madeira, refletindo no aumento do rendimento em carvão vegetal e na

melhoria de suas propriedades. Contudo, a tecnologia de produção de carvão vegetal ainda se baseia na utilização de fornos rudimentares de pequenas dimensões, pois a maior parte da produção brasileira de carvão vegetal é realizada por pequenos e médios produtores.

Os fornos de alvenaria mais utilizados no Brasil apresentam baixos rendimentos gravimétricos de conversão da madeira em carvão vegetal e emitem grandes quantidades de gases poluentes na atmosfera, contribuindo para um ambiente de trabalho insalubre e para danos ao meio ambiente. Isto ocorre porque o controle da carbonização acontece de maneira subjetiva, por meio da experiência do carbonizador, que se baseia na coloração dos gases e na temperatura externa do forno obtida pelo seu tato, e pela inexistência de qualquer medida de controle das emissões nesses fornos.

As grandes empresas produtoras de carvão vegetal desenvolveram, ao longo dos últimos anos, diversos estudos para encontrar alternativas para o aproveitamento dos gases gerados durante a carbonização, por meio da condensação ou da queima. Na condensação obtêm-se o alcatrão e o licor pirolenhoso. Contudo, não existe uma cadeia sólida e sustentável que abrange a produção, o coprocessamento e o consumo desses subprodutos, o que resulta em desvantagem competitiva em termos de aplicações e preços, quando comparados aos dos derivados de petróleo, desestimulando a sua recuperação, podendo gerar passivos ambientais.

Considerando esses aspectos, tem-se observado maior interesse em estudos a respeito do aproveitamento dos gases da carbonização através da sua combustão em fornalhas ou queimadores. Pretende-se ainda alcançar, ao mesmo tempo, a melhoria do ambiente de trabalho e a obtenção de energia térmica para sua utilização na secagem de lenha, ou mesmo para produção de energia elétrica. Contudo, para que estas tecnologias sejam implantadas pelos produtores de carvão vegetal, elas devem ser eficientes e, principalmente, de baixo custo.

Visando atender à demanda por tecnologias mais eficientes, de maior durabilidade e de menor custo para conversão de madeira em carvão, buscou-se, neste trabalho, avaliar o funcionamento de um sistema forno-fornalha para reduzir as emissões atmosféricas e maximizar o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Avaliar o funcionamento de um sistema forno-fornalha com baixa emissão de gases poluentes, maximizando o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

### 2.2 Objetivos específicos

- Avaliar um medidor infravermelho de temperatura como ferramenta para controle da carbonização.
- Ajustar faixas de controle da carbonização em função do tempo e da temperatura, levando em consideração os aspectos teóricos da degradação térmica dos principais componentes químicos da madeira.
- Elaborar o perfil térmico do forno durante as etapas de carbonização e resfriamento.
- Avaliar o funcionamento da fornalha para a queima dos gases gerados durante a carbonização da madeira.
- Determinar o rendimento gravimétrico e as propriedades físicas e químicas do carvão obtido no sistema forno-fornalha.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Contexto energético

Segundo dados do Balanço Energético Nacional - BEN (EPE, 2011), na década de 1940 83,3% da oferta interna brasileira de energia tinha como fonte a lenha e o carvão vegetal, enquanto a participação do petróleo e das hidrelétricas era de 6,4 e 1,5%, respectivamente, e a dos produtos da cana-de-açúcar de 2,4%. De acordo com o mesmo documento, em 2010 o petróleo passou a ser a fonte de energia interna com maior participação (47,9%), seguido pelos produtos da cana-de-açúcar, com 17,8%, e hidrelétricas, com 14%. A lenha e o carvão vegetal, que eram as principais fontes, apresentaram uma participação de 9,7%, enquanto o carvão mineral e outras fontes ficaram com cerca de 5% cada. Mesmo com estas mudanças, o Brasil continua se destacando no cenário mundial pela utilização de fontes renováveis para o suprimento de energia.

De acordo com o BEN, no ano-base de 2010 (EPE, 2011), do total de lenha produzida no Brasil 33% foram transformados em carvão vegetal, 2% foram usados diretamente para geração de energia elétrica e os 65% restantes consumidos nos setores industrial, agropecuário e residencial.

Por vários anos a produção brasileira de carvão vegetal utilizou madeira oriunda da exploração da vegetação nativa como matéria-prima. O investimento em florestas plantadas possibilitou o desenvolvimento da cadeia produtiva do carvão. De acordo com Matarelli *et al.* (2001), os plantios para produção de carvão com fins siderúrgicos iniciaram-se no Brasil de maneira pioneira e intensiva em 1937. Entretanto, só a partir de 1960, por meio do Programa de Incentivo Fiscal ao Florestamento e Reflorestamento, houve aumento das áreas de florestas plantadas em todo o País, proporcionando a utilização da madeira como fonte energética pelas indústrias.

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF (2011), o Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, e os principais consumidores são os setores de ferro-gusa, aço e ferros-liga, e em menor escala as indústrias de cerâmica e de cimento, o comércio e o consumidor residencial. Atualmente o consumo de carvão vegetal, em consequência da atividade siderúrgica, concentra-se em Minas Gerais, maior estado consumidor; nos estados do Maranhão e Pará, no pólo

siderúrgico de Carajás, onde predomina o consumo de carvão originado de vegetações nativas; e no estado do Mato Grosso do Sul, o mais novo pólo siderúrgico nacional (REZENDE; SANTOS, 2010).

De acordo com dados da Associação Mineira de Silvicultura - AMS (2009), apesar dos investimentos ocorridos nos últimos anos, ainda existe um déficit de 600 mil/ha/ano de floresta plantada para suprir a demanda de carvão vegetal para abastecimento do setor de ferro-gusa no Brasil, sendo 120 mil/ha/ano para o estado de Minas Gerais. Assim, de acordo com ABRAF (2011), aproximadamente 55% da madeira utilizada hoje como matéria-prima para produção de carvão vegetal no Brasil ainda é proveniente de florestas nativas, ocasionando uma pressão sobre os remanescentes florestais.

Contudo, as empresas florestais e a Associação Mineira de Silvicultura (AMS), em conjunto com o governo estadual de Minas Gerais, criaram o “Pacto da Sustentabilidade”, que serviu de base para a aprovação da Lei 18.365/09, sancionada em 2009 pelo governador do estado de Minas Gerais. A Lei estabelece que em nove anos 95% de toda madeira necessária para carvoejamento seja originada de florestas plantadas. O pacto serviu de base para elaboração do Projeto de Lei 317/11, que tramita na Câmara Federal, proibindo o uso de carvão vegetal produzido com madeira de extrativismo. Pela proposta, em dez anos, contados a partir da entrada em vigor da Lei, 100% do carvão utilizado pelas indústrias deverá ser produzido com madeira de florestas plantadas.

Segundo informações da Câmara Setorial de Silvicultura do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o setor siderúrgico nacional foi bastante afetado pela crise econômica mundial, iniciada no fim de 2008, que provocou drástica redução nos preços do ferro-gusa e aço, repercutindo na queda do preço do carvão vegetal. Nos últimos meses de 2008, 65% dos fornos para produção de carvão existentes no País não estavam em funcionamento, demonstrando a gravidade da crise sobre o segmento siderúrgico.

O efeito da crise econômica mundial sobre o carvão vegetal foi a queda de mais de 50% no preço deste insumo. Segundo dados do Centro de Inteligência em Florestas (CIFLORESTAS, 2011), no período de novembro de 2008 a maio de 2009 o preço médio era de R\$ 65,00/MDC, enquanto no período anterior à crise seu chegou a ser comercializado por R\$ 210,00/MDC. Devido ao baixo preço, os produtores tiveram

grande dificuldade para comercializar o carvão, e quando conseguiam vendê-lo o valor pago não cobria os custos de produção.

O ano de 2010 marcou a retomada do crescimento econômico brasileiro. Mesmo com o carvão sendo comercializado com valor médio de R\$ 120,00/MDC, valor que viabiliza a produção de carvão vegetal, o setor siderúrgico continuou, nesse ano, com a produção abaixo da capacidade total, afetando principalmente os produtores independentes de ferro-gusa, que normalmente adquirem carvão vegetal produzido pelos pequenos e médios produtores de carvão vegetal.

Devido ao aumento da demanda de ferro-gusa ocorrido no final de 2010, algumas siderúrgicas retomaram a produção para atender o mercado externo, esperando uma recuperação, mesmo que parcial. Nesse período a produção atingiu 50% da capacidade instalada (ABRAF, 2011). A recuperação do setor produtor de ferro-gusa refletiu no mercado de carvão vegetal, que a partir dos últimos meses de 2010 observou a elevação do preço médio do insumo. Em 2011 a situação permaneceu nos mesmos patamares verificados no último trimestre de 2010.

Segundo a ABRAF (2011), a continuidade da situação econômica desfavorável do setor foi devido à forte dependência da demanda externa, prejudicada pela redução da exportação de gusa para os mercados americanos e asiáticos, que substituíram o produto brasileiro pelo ferro-gusa oriundo de países como a Rússia e a Ucrânia; à ampliação das importações de aço, reduzindo o consumo interno de ferro-gusa; e à valorização cambial do real, colaborando para a redução da remuneração interna pelo produto exportado. Esses fatores combinados comprometeram a retomada da produção de ferro-gusa e de carvão vegetal.

### **3.2 Aspectos teóricos da degradação térmica da madeira**

Os principais componentes da madeira são celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos. A celulose é o maior constituinte da madeira, correspondendo a 40-45%, localizando-se predominantemente na parede secundária. É um polímero composto por unidades de  $\beta$ -D-glicopirranose, interligadas por ligações glicosídicas  $\beta$  1-4, formando longas cadeias lineares e não ramificadas. As hemiceluloses são polímeros formados por diferentes unidades de açúcares. Formam cadeias ramificadas e correspondem de 15 a 25% da constituição da madeira. As ligninas são macromoléculas amorfas, complexas, formadas por unidades de fenilpropano, com maior concentração na lamela média. Nas folhosas apresentam proporção de 18 a 25%, podendo chegar a teores maiores que 30%

em folhosas de espécies madeireiras tropicais. Os extrativos são compostos químicos, geralmente formados a partir de graxas, ácidos graxos, álcoois graxos, fenóis, terpenos, esteroides, resinas ácidas, resinas, ceras e de alguns outros tipos de compostos orgânicos (SJÖSTRÖM, 1993; ROWELL *et al.*, 2005).

Devido à natureza da composição química e às diferenças inerentes à estrutura, cada constituinte da madeira decompõe-se mais intensamente diante do calor necessário para carbonização, ou seja, cada componente apresenta maior degradação térmica em uma determinada faixa de temperatura. De acordo com Byrne e Nagle (1997), a pirólise da madeira origina os mesmos produtos que seriam obtidos por meio da pirólise separada de seus principais componentes. Esses autores relatam que a pirólise não ocorre de maneira simultânea, mas em etapas. O primeiro componente que se degrada são as hemiceluloses, na temperatura de 200 a 260°C; seguida da celulose (240 a 350°C) e da lignina, cuja degradação inicia-se a 150°C, e se mantém até 500°C.

Yang *et al.* (2007), ao estudarem a degradação térmica dos principais componentes da madeira durante o processo de pirólise, verificaram que as hemiceluloses são mais facilmente degradadas entre 220 e 315°C, com a maior perda de massa em 268°C. A celulose degrada-se em temperaturas mais elevadas, 315-400°C, e em 355°C ocorre a maior degradação térmica. Segundo os autores, em relação a estes três componentes da madeira, a lignina possui a decomposição térmica mais difícil, ocorrendo de 160-900°C, com pouca perda de massa, sendo o principal responsável pelo resíduo sólido gerado pelo processo de pirólise.

A celulose, componente presente em maior porcentual na madeira, é o componente químico com maior contribuição sobre a degradação térmica da madeira (GAO *et al.*, 2004). De acordo com esses autores, a perda de massa da celulose inicia-se em temperatura acima de 300°C, ocorrendo de maneira rápida para produzir a mínima massa de matéria carbonizada e a maior quantidade de voláteis dentre todos os componentes da madeira. Milosavljevic *et al.* (1996) afirmam que a principal rota de degradação térmica da celulose é a endotérmica. Somente acima de 400°C, quando a celulose encontra-se quase que completamente pirolisada, é que o processo torna-se exotérmico. Yang *et al.* (2007) observaram, na temperatura de 355°C, o maior pico endotérmico da celulose, enquanto para essa mesma temperatura a degradação da lignina e das hemiceluloses são exotérmicas.

Frederico (2009) relatou que os produtos da decomposição térmica da celulose são solúveis em água, que está presente quase que totalmente no licor pirolenhoso. De

acordo com Yang *et al.* (2007), o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são os principais gases gerados durante a degradação térmica da celulose, considerando a temperatura máxima de 500°C.

As hemiceluloses, por terem estrutura amorfa e ramificada, são mais facilmente degradadas termicamente do que a celulose, e são convertidas em diferentes produtos, como furfural para a madeira de folhosas e outros oligossacarídeos (FREDERICO, 2009). Durante a degradação térmica das hemiceluloses, até a temperatura de 500°C são formados principalmente CO<sub>2</sub> e CO (YANG *et al.*, 2007). Segundo esses autores, as reações de degradação térmica das hemiceluloses caracterizam-se como exotérmicas, entre 150 e 500°C, com pico máximo de liberação de energia a 275°C, temperatura na qual ocorre sua máxima perda de massa.

Oliveira *et al.* (1984) ressaltam que a lignina apresenta elevada estabilidade térmica, proporcionando rendimento em carvão vegetal de 55%, quando aquecida à temperatura de 400°C. Embora a decomposição da lignina se inicie em temperaturas próximas a 200°C, apenas uma pequena fração se decompõe em temperatura inferior a 400°C (ELYOUNSSI *et al.*, 2010). Esses autores afirmam que a degradação térmica da lignina produz um resíduo carbonoso (carvão) e uma fração constituída de uma mistura de compostos fenólicos, o alcatrão. Segundo Taccini (2011), as reações de degradação da lignina ocorrem entre 150 e 500°C, com pico máximo de liberação de energia a 365°C, temperatura não correspondente ao ponto de máxima perda de massa.

Em temperaturas maiores que 400°C, as ligações químicas presentes na lignina são rompidas, mas as perdas de massa para a lignina não ultrapassam 60%, sendo este constituinte o responsável pela maior parte do carvão vegetal (SOARES, 2011). De acordo com Yang *et al.* (2007), a degradação térmica da lignina é exotérmica a partir de 200°C e os principais gases gerados são CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

### **3.3 Processo de carbonização da madeira**

A produção de carvão vegetal ocorre em ambientes fechados, com condições controladas de oxigênio, aplicando-se calor à madeira para sua destilação e para o desdobramento de seus constituintes em gases (dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, entre outros), líquido (alcatrões, ácido acético, álcool metílico, entre outros) e sólido, o carvão vegetal (REZENDE, 2006). O processo de carbonização ocorre em temperaturas superiores a 150°C, com o rendimento do processo variando com as condições da madeira utilizada e da tecnologia de conversão empregada.

De acordo com Vale e Gentil (2008), o principal objetivo da carbonização é a eliminação da maior parte do oxigênio e do hidrogênio presente na madeira pela ação do calor e, conseqüentemente, a concentração do carbono na fração sólida – carvão vegetal. A transformação da madeira em carvão é um processo de decomposição térmica físico-química irreversível, que se inicia com a secagem, e depois de perdida a água livre e a água de adesão inicia-se a fase de pirólise, produzindo gases condensáveis e não condensáveis, além do carvão vegetal.

Durante a carbonização ocorre uma sequência de reações químicas e físicas dependentes do tempo e da temperatura, e como resultado há a liberação de vapor de água, líquidos orgânicos, gases condensáveis e não condensáveis, restando como produto final sólido o carvão vegetal. Os produtos gerados são influenciados pela composição química da madeira convertida em carvão vegetal.

Segundo Brito (1990), os produtos gerados na carbonização da madeira, além do carvão vegetal, podem ser caracterizados em água e produtos orgânicos, incluindo o ácido acético, metanol, compostos aromáticos, derivados fenólicos, aldeídos e breu ou piche; e em gases não condensáveis, dentre os quais se destacam o metano ( $\text{CH}_4$ ), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e os hidrocarbonetos.

A emissão de gases não condensáveis pode ser dividida em duas zonas. A primeira ocorre entre 275 e 425°C e caracterizada pela ocorrência dos maiores picos de emissão de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ . A segunda zona ocorre a temperaturas acima de 450°C, apresentando baixas concentrações de óxidos de carbono,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$  (GONZÁLEZ *et al.*, 2003). Portanto, os gases gerados na carbonização são substâncias ricas em carbono e hidrogênio, que ao sofrerem combustão, nas condições adequadas de temperatura e na presença de oxigênio, podem liberar energia e tornar as emissões constituídas apenas por vapor de água e  $\text{CO}_2$ .

Segundo Taccini,  $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$  são os principais produtos gasosos da pirólise, devendo ser ressaltado que a quantidade de  $\text{CO}$  produzido aumenta entre 400 e 900°C e que o rendimento de  $\text{CO}_2$  tende a estabilizar ou a decrescer em altas temperaturas. As emissões de  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$  ocorrem em menor escala, apresentando a tendência de aumento com a elevação da temperatura.

Com base na composição básica da madeira, na degradação térmica de seus principais componentes, nos produtos gerados e no rendimento gravimétrico em carvão vegetal com boa qualidade, o processo de carbonização da madeira pode ser

dividido em faixas de temperatura. Considerando essas variáveis, diversos autores dividem a carbonização em faixas distintas.

Elyounssi *et al.* (2010) dividem o processo de carbonização da madeira em duas fases. A primeira ocorre em baixas temperaturas, demandando pouca energia para decompor a maior parte da celulose e das hemiceluloses, havendo perda de massa variando de 50 a 60%. Na segunda fase ocorre a decomposição da lignina, sendo necessário o aumento constante da temperatura até 600°C.

Segundo Rezende (2006), o processo de carbonização da madeira ocorre em quatro fases: na primeira fase ocorre a secagem da madeira até a temperatura de 110°C, havendo somente liberação de água. Na segunda fase, que varia de 110 a 250°C, a 180°C tem início a liberação da água de constituição pela decomposição da celulose e hemiceluloses e pouca massa é perdida até 250°C. Forma-se a madeira semicarbonizada ou aticho. A terceira fase ocorre entre 250°C e 350°C, com a intensificação da decomposição da celulose e hemiceluloses, havendo expressiva perda de massa e formação de gases, óleo e água. Ao atingir a temperatura de 350°C o carvão tem aproximadamente 75% de carbono fixo e se considera que a carbonização está praticamente pronta. Na quarta fase, de 350°C a 500°C, reduz-se gradualmente a liberação de voláteis, principalmente gases combustíveis, continuando a fixação de carbono.

Diversas reações químicas ocorrem durante o processo de carbonização, as quais estão estritamente relacionadas com a temperatura a que se submete a madeira. De acordo com Raad (2004), pode-se descrever o processo em função da temperatura como segue:

- Temperaturas abaixo de 100°C: a madeira perde a água ligada higroscopicamente.

- Temperaturas na faixa de 105 a 200°C: ocorre o desprendimento de água de constituição. Nesta faixa pode-se afirmar que o processo de decomposição dos componentes da madeira é estável em períodos não prolongados de exposição de calor nestas temperaturas.

- Temperaturas entre 200 e 270°C: são desprendidos os produtos voláteis da decomposição da madeira, como ácido acético, metanol, alcatrão e gases não condensáveis como o CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

- Temperaturas entre 270 e 500°C: à medida que se eleva a temperatura, as reações químicas vão tornando-se mais complexas, e acima de 270°C essas reações de

decomposição ocorrem mais intensamente, sendo, em grande parte, com liberação de calor (reações exotérmicas). O carvão vegetal é gerado como produto final.

- Temperaturas acima de 500°C: o carvão vegetal sofre degradação térmica, iniciando a gaseificação.

Trugilho *et al.* (2001) classificam as etapas ocorrentes durante a carbonização de acordo com a faixa de temperatura e os fenômenos de reação. Segundo os autores, na primeira etapa, com faixa de temperatura de 100° a 200°C, ocorre a secagem da madeira e a reação é, nesse momento, endotérmica. Na etapa com faixa de temperatura entre 200° e 280°C ocorre a liberação de ácido acético, metanol, H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, entre outros, e a reação continua endotérmica. Entre 280 e 500°C, a reação passa a ser exotérmica e ocorre liberação de gases, como CO, CH<sub>4</sub> e alcatrões, e sob temperaturas acima de 500° C ocorre liberação de pequenas quantidades de voláteis, especialmente o H<sub>2</sub>.

Portanto, o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal produzido dependerão das características da madeira utilizada como matéria-prima, do modo de condução da carbonização, mediante o controle da temperatura, da taxa de aquecimento, do tempo de exposição da madeira ao calor e da tecnologia empregada na conversão, ou seja, o tipo de forno.

### **3.4 Fornos de alvenaria para produção de carvão vegetal**

A produção brasileira de carvão vegetal continua, mesmo com os avanços tecnológicos nos sistemas de conversão da madeira em carvão, ocorrendo em fornos rudimentares de alvenaria. Segundo Brito (2010), 60% dos fornos utilizados são do tipo “rabo-quente”; 10% são fornos de superfície; 20% da produção ocorrem em fornos retangulares e os 10% restantes são realizadas por outras tecnologias.

Os pequenos e médios produtores, responsáveis por cerca de 80% da produção total de carvão, optam por fornos de baixa capacidade volumétrica, devido ao elevado custo com maquinário e ao maior investimento inicial para a construção de fornos de maiores dimensões. Segundo Oliveira (2009), esses produtores utilizam fornos de diferentes formatos para produção de carvão vegetal, destacando-se os fornos do tipo “rabo-quente”, superfície e encosta. As formas e os tamanhos distintos fazem com que o processo seja irregular, de baixo rendimento e dependente diretamente da experiência do operador, devido à inexistência de instrumentos para medição das variáveis do

processo. Nestes fornos não existe a possibilidade de mecanização e o controle das emissões atmosféricas, pois se existisse seria oneroso.

#### **3.4.1 Forno “rabo quente”**

O modelo mais simples de forno de alvenaria e mais difundido entre os pequenos produtores é o forno denominado “rabo-quente”. De acordo com Mendes *et al.* (1982), sua construção é recomendada para áreas planas, e ao longo de toda a extensão de sua parede são deixados orifícios para a entrada de ar e saída dos gases gerados. Esses fornos são de baixo custo e fácil manuseio, podendo um único trabalhador operar de sete a dez fornos, realizando as atividades de carregamento, controle da carbonização, descarga, deposição na praça e limpeza da área (MINETTE, 2007). O custo médio de construção do forno “rabo-quente” é de R\$ 106,10/m<sup>3</sup> (CARNEIRO *et al.*, 2011).

O progresso da carbonização é avaliado pela coloração dos gases liberados através dos orifícios, e o controle ocorre pelo fechamento progressivo das entradas de ar. O processo completo tem duração de sete dias, sendo três dias para carbonizar, três para resfriar e um dia para descarga e carregamento do forno.

O controle subjetivo da carbonização impossibilita o controle adequado da temperatura interna do forno, prejudicando a qualidade do carvão vegetal e elevando a produção de madeira semicarbonizada (atiço). O forno “rabo-quente” apresenta baixo rendimento gravimétrico, variando de 20 a 28%, devido ao excesso de queima da madeira e de suas características rudimentares (MENDES *et al.*, 1982). Este tipo de forno não possui sistema para minimizar as emissões de poluentes.

#### **3.4.2 Forno de encosta**

O forno de encosta é bastante utilizado nas regiões de topografia acidentada, com diâmetro variando de 3 a 4 m e altura entre 2,5 a 2,8 m, podendo ter de uma a três chaminés. Para sua construção aproveita-se o desnível natural do terreno, apoiando a cúpula sobre a borda do terreno, que assume a função de parede do forno, reduzindo a quantidade de material utilizado na construção. Para condução da carbonização, as entradas de ar são posicionadas na cúpula (MENDES *et al.*, 1982).

Segundo Baer Filho (2008), os fornos de encosta atingem 32% de rendimento em carvão vegetal. O autor afirma que o elevado rendimento ocorre porque a maior parte do forno está em contato direto com o solo, havendo menores perdas térmicas para o ambiente, o que aumenta a eficiência da carbonização. No entanto aumenta o ciclo de produção devido ao resfriamento ocorrer mais lentamente.

O controle da carbonização no forno de encosta baseia-se na quantidade e coloração dos gases emitidos pelas chaminés. A frente de carbonização desenvolve-se de maneira desuniforme. Assim, é possível que o aspecto dos gases em cada uma das chaminés não seja semelhante. O ciclo de carbonização tem duração de cinco a nove dias (MENDES *et al.*, 1982). De acordo com Carneiro *et al.* (2011), o preço médio dos fornos de encosta é de R\$ 77,81/m<sup>3</sup>.

### 3.4.3 Forno de superfície

Os fornos de superfície apresentam estrutura semelhante à do forno “rabo- quente”, tendo como inovação a presença de uma chaminé lateral com tiragem central dos gases gerados durante a carbonização da madeira, melhorando as condições térmicas e o fluxo de gases no interior do forno (ASSIS, 2007).

O diâmetro central pode variar de 3 a 8 metros, sendo o de 5 metros o mais comum; a altura central varia de 2,3 a 5 metros. As entradas de ar encontram-se na parede e no cúpula do forno, ao longo de toda circunferência (ARRUDA, 2005). Em virtude de suas características construtivas, os fornos de superfície apresentam melhores condições para propagação da carbonização, que ocorre de maneira mais homogênea devido ao maior controle do operador.

De acordo Mendes *et al.* (1982), a operação nesses fornos é mais simples, pois os gases são expelidos somente pela chaminé e o acompanhamento do processo de carbonização pode ser avaliado pela temperatura externa e inspeção visual das aberturas para entrada de oxigênio.

O forno de superfície apresenta rendimento gravimétrico variável de 28 a 34% e custo de construção de R\$120,25/m<sup>3</sup> (CARNEIRO *et al.*, 2011).

Diversas alterações no forno de superfície foram realizadas com o intuito de melhorar o processo de produção de carvão vegetal, modificando o posicionamento e número de entradas de ar, a dimensão e posição da chaminé e a adaptação de câmara de combustão externa ao forno.

O forno de superfície com câmara de combustão externa é um derivado do forno de superfície tradicional. A função da câmara externa é fornecer por meio da queima de materiais lignocelulósicos como lenha, cascas, galhos e atijo de outras carbonizações, o calor necessário para a transformação da madeira em carvão vegetal. O calor gerado é direcionado por ductos até o interior do forno (MARRI *et al.*, 1982).

Segundo Assis (2007), uma pequena quantidade de material é queimada na câmara para secagem da carga de madeira e acendimento do forno. Quando o processo de ignição se completa, o processo de carbonização é controlado pela quantidade de ar que entra pela câmara de combustão, não existindo aberturas nas paredes do forno para controle da entrada de ar. Não havendo queima da madeira no interior do forno e melhor aproveitamento do espaço interno, o sistema apresenta maior rendimento gravimétrico.

O forno JG<sup>®</sup> é uma variação do forno de superfície, desenvolvido pelo engenheiro florestal José Gonçalves. Construído com tijolos de barro cozido, possui uma chaminé, e uma cinta metálica é colocada externamente à parede, para elevar a durabilidade do forno. Dependendo do projeto, pode ter uma ou duas portas, para o carregamento e descarregamento manual.

Atualmente é o forno mais difundido entre os pequenos e médios produtores de carvão vegetal, devido ao seu elevado rendimento gravimétrico, à vida útil razoável e ao custo acessível, se comparado ao dos demais fornos de menor capacidade volumétrica. Segundo Carneiro *et al.* (2011), os fornos JG são geralmente construídos com diâmetro médio de 3 m e altura central de 2,3 m, apresentando custo de R\$212,21/m<sup>3</sup>.

#### **3.4.4 Forno retangular**

Visando aumentar a produtividade e obter um produto com maior qualidade, os grandes produtores de carvão vegetal investiram na construção de fornos com grande capacidade volumétrica. De acordo com Raad (2001), os fornos retangulares têm capacidade de enforamento de até 700 estéreos (st) de madeira e as operações de carregamento e descarregamento são mecanizadas. Além disso, é possível a recuperação ou queima dos gases gerados durante a carbonização.

Arruda (2005) ressalta que nesse tipo de forno o controle da entrada de oxigênio para o processo de carbonização pode ser realizado através de abertura de controle da entrada de ar ou câmara de combustão externa, construídas em alvenaria na parte

externa do forno, que são interligadas através de canais, onde os gases aquecidos circulam, promovendo a transformação da madeira em carvão vegetal.

O ciclo completo de carbonização nos fornos retangulares tem duração média de 12 dias, incluindo as etapas de carregamento, ignição, carbonização, resfriamento do leito de carvão e descarga, sendo normalmente quatro dias para carbonizar a madeira e oito dias para o resfriamento do forno (FÁVERO *et al.*, 2007). A carbonização não ocorre de maneira uniforme, devido às dimensões e características geométricas do forno.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal desses fornos varia de 30 a 35%. Para aumentar a eficiência da carbonização, as empresas têm adotado o monitoramento da temperatura interna dos fornos. Segundo Arruda (2005), o monitoramento térmico, seja através de termopares ou de leitura da temperatura em vários pontos utilizando um medidor infravermelho, permite melhor controle da carbonização. De acordo com Oliveira (2009), a utilização de um sistema supervisório de monitoramento de temperatura em fornos retangulares auxiliou na identificação e correção de desvios no processo de produção em tempo real, diminuindo as falhas operacionais. Nas carbonizações controladas com o auxílio de sensores de temperatura no interior do forno, o rendimento gravimétrico eleva-se, aumentando a produtividade dos fornos, além de resultar em produção de carvão vegetal mais homogêneo em termos de qualidade.

Para melhorar o processo de carbonização, além da adoção de mecanismos de controle da temperatura do forno, diversos sistemas (trocadores de calor) estão sendo desenvolvidos para reduzir seu tempo de resfriamento e conseqüentemente elevar a produtividade dos fornos, permitindo maior número de carbonizações para um mesmo período.

O custo de construção desse forno fica em torno de R\$ 200.000,00/forno. Portanto, para viabilizar economicamente a construção dos fornos retangulares, eles devem ser instalados em uma mesma unidade de produção de carvão vegetal, com produção mensal de pelo menos 500 metros cúbicos de carvão (mdc) (BRITO, 2010).

### **3.4.5 Forno MF1-UFV**

O forno MF1-UFV foi desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa, em parceria com a empresa Arcellor Mittal Bioenergia. Trata-se de um forno em formato

retangular com capacidade para carbonizar 10 st de madeira, acoplado a uma fornalha para combustão de gases gerados durante o processo de carbonização.

Para conferir maior resistência ao forno e à fornalha, devido às grandes pressões geradas no sistema devido à produção de gases e calor, pilares laterais unidos com vigas transversais foram construídos com concreto armado (CARDOSO, 2010).

A entrada de ar no forno ocorre através de quatro aberturas de cada lado do forno, e o controle da carbonização é realizado a partir da temperatura obtida por termopares instalados na cúpula do forno.

O forno MF1-UFV apresenta rendimento gravimétrico médio de 29% e teores de atíção e finos de carvão vegetal inferiores a 4% (CARDOSO, 2010). O autor ressalta que a queima dos gases combustos pela fornalha reduz a emissão de metano ( $\text{CH}_4$ ) e de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) para a atmosfera em 94 e 97%, respectivamente, durante a carbonização da madeira.

O ciclo de carbonização da madeira no forno MF1-UFV tem duração média de cinco dias, incluindo o carregamento, a carbonização, o resfriamento e a descarga. De acordo com Cardoso *et al.* (2010), o custo médio de construção do forno foi de R\$1700,00 e de R\$1800,00 para a construção da fornalha e da chaminé.

### 3.5 Fornalhas para combustão dos gases da carbonização

Os gases gerados durante o processo de carbonização são substâncias combustíveis ricas em carbono e hidrogênio, que sob condições adequadas de temperatura e pressão são capazes de sofrer reações químicas na presença de oxigênio, liberando energia sob a forma de luz e calor. Na carbonização da madeira são gerados gases não condensáveis, sendo os principais  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CH}_4$  (YANG *et al.*, 2007; TACCINI, 2011). No caso de queima completa desses gases, as emissões seriam constituídas apenas de  $\text{CO}_2$  e vapor de água. Segundo Carvalho Júnior e Mcquay (2007), a combustão completa ocorre quando o carbono presente no combustível é oxidado para dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o hidrogênio para água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e o enxofre para dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ). Quando os produtos gerados são monóxidos, considera-se a combustão como incompleta.

LOPES *et al.* (2000) definem a combustão como um conjunto de reações químicas nas quais os elementos combustíveis se combinam com o oxigênio, liberando energia quando o combustível atinge a temperatura de ignição. Os autores afirmam que

o controle da combustão objetiva assegurar a mistura do comburente e combustível na dosagem correta, no tempo certo e na temperatura ideal, de modo a garantir a queima completa do combustível, liberando toda energia nele contida.

Para que a combustão ocorra eficientemente, são necessários três elementos básicos: temperatura, turbulência e tempo. A temperatura deve ser igual ou superior à temperatura de ignição, sendo suficiente para iniciar e manter a queima do combustível; a turbulência refere-se à mistura adequada do ar com o combustível, sendo necessário o contato entre comburente e combustível; e o tempo deve ser suficiente para a ocorrência da reação de combustão (LOPES, 2002).

Alguns parâmetros da combustão são estudados com o objetivo de definir as condições ideais que reflitam na melhor eficiência do processo. Segundo Magalhães (2007), define-se ar estequiométrico como a quantidade mínima de ar necessário para reagir quimicamente com o combustível durante o processo de combustão, garantindo sua queima. A quantidade exata de ar admitida no processo é calculada em função da composição elementar média do combustível utilizado. Mas para garantir a queima completa do combustível, normalmente uma quantidade maior que o ar estequiométrico é necessária. Para Lopes *et al.* (2000), o excesso de ar garante melhor contato com o combustível, proporcionando sempre uma quantidade suficiente de ar para o processo de combustão.

Com o objetivo de diminuir as emissões de gases gerados durante a carbonização para a atmosfera, tem sido realizada a combustão desses em queimadores ou fornalhas. De acordo com Magalhães (2007), fornalhas são dispositivos projetados visando à maior eficiência da combustão e possibilidade de aproveitamento da energia térmica liberada durante o processo de combustão.

Os queimadores ou fornalhas acoplados a fornos de carbonização têm o objetivo de incinerar os gases gerados durante o processo, transformando a poluição em energia na forma de calor. Estes equipamentos conferem as unidades de produção de carvão vegetal um aspecto limpo e contribuem para o processo de carbonização, auxiliando na tiragem de gases do interior do forno para a fornalha em função da pressão negativa gerada no sistema pela chaminé do queimador.

As fornalhas possuem características semelhantes de construção, diferindo apenas na forma, no tamanho e na localização das entradas de ar e combustível (MAGALHÃES, 2007). Segundo Silva (1998), as fornalhas são compostas por uma câmara de combustão, onde os combustíveis são completamente oxidados; uma grelha,

onde se apoia o combustível sólido; aberturas de entrada e saída, destinadas ao carregamento do combustível sólido e as passagens do ar ambiente e do ar aquecido para o fim a qual será destinado; e por um cinzeiro, onde são depositados os resíduos da combustão.

No caso de uma fornalha para queima de combustível gasoso, como os gases gerados durante a carbonização da madeira, a grelha e o cinzeiro são desnecessários, reduzindo os custos da fornalha. Neste tipo de dispositivo, além das entradas para passagem do ar comburente para o interior da fornalha e a saída dos gases gerados devido à combustão dos gases, o volume da câmara de combustão é um dos requisitos a serem considerados. A câmara deve comportar todo o volume de gás gerado na carbonização e realizar a oxidação completa desses gases. Outro parâmetro importante é o fluxo de gases do forno de carbonização para a câmara de combustão, que pode ser controlado na saída de gases do forno por meio de um registro ou guilhotina.

Uma fornalha projetada de forma otimizada deve apresentar dimensões mínimas que permitam uma combustão eficiente com o mínimo de excesso de ar. Pequenos volumes podem ocasionar a combustão parcial, com presença de material ainda combustível (incombustos) nos gases lançados pela fornalha, enquanto grandes volumes podem dificultar o processo de ignição do combustível, devido em virtude da menor temperatura na câmara de combustão devido a maior superfície de irradiação (LOPES, 2002).

Outro fator a ser considerado na construção de fornalha para a queima de gases gerados durante a carbonização é a utilização dos materiais construtivos, pois durante a queima destes gases são obtidas temperaturas na câmara de combustão que variam de 650 a 1150°C. Logo, para aumentar a durabilidade da fornalha e evitar as perdas térmicas são empregados materiais isolantes na construção. Além da utilização de tijolos e argamassa refratária, deve-se aplicar manta cerâmica no interior da fornalha, onde haverá contato direto com o calor. Além de isolar termicamente, a manta cerâmica protege os tijolos ou outro material utilizado na construção, aumentando a eficiência do processo de combustão e elevando a vida útil da fornalha.

### **3.6 Controle da carbonização via sensores de temperatura**

Embora a produção de carvão vegetal tenha evoluído nos materiais construtivos e nas dimensões, o controle da carbonização em fornos retangulares, em grande parte das unidades produtoras de carvão, ainda ocorre de forma precária, com base em

critérios subjetivos e na produção em pequenos fornos. Segundo Campos (2008), o controle operacional subjetivo dos fornos de carbonização baseia-se na coloração da fumaça, na temperatura das paredes do forno sentida pelo tato e na observação da aparência dos controladores de ar, refletindo em baixo rendimento gravimétrico e índices inferiores de qualidade do carvão vegetal.

Ferramentas baseadas nas variáveis da carbonização, como temperatura interna, pressão, taxa de aquecimento e vazão dos gases, estão sendo desenvolvidas para reduzir o subjetivismo e auxiliar o controle do processo, maximizando a produção de carvão e melhorando as condições de trabalho nas unidades produtoras. Assim, empresas que utilizam fornos retangulares e fornos circulares de menores dimensões estão usando sensores infravermelhos portáteis, termovisores e sistemas supervisórios para mensuração da temperatura interna do forno, o que, conseqüentemente, contribui para o melhor controle da carbonização. Oliveira (2009) afirma que o controle da temperatura interna dos fornos pode evitar elevações indesejáveis de temperatura, ocasionadas pela entrada de ar em rachaduras nas paredes dos fornos ou pela imperícia no controle da abertura e fechamento das entradas de ar e chaminés do forno.

De acordo com Raad (2001), a produção de carvão vegetal monitorada via sensor infravermelho, associada a um programa de gerenciamento de fornadas, proporciona maior controle dos processos de carbonização e resfriamento, resultando em ganhos representativos no rendimento gravimétrico. O monitoramento da temperatura interna do forno permite o acompanhamento térmico da carbonização, aumentando a eficiência do processo (ARRUDA *et al.* 2011). Segundo os autores, a inserção de pontos de medição de temperatura nas paredes e na cúpula do forno permite melhor controle da carbonização, sendo desnecessária a utilização de critérios subjetivos.

Jurizato e Pereira (2003) relataram que os sistemas supervisórios podem ser vistos como sistemas que supervisionam ou monitoram processos executados em uma planta industrial, por meio da visualização de variáveis da planta que está sendo automatizada, bem como das ações tomadas no sistema supervisionado, permitindo assim, o monitoramento e o controle dos processos. Em fornos para produção de carvão vegetal o sistema supervisório consiste em sensores térmicos posicionados nas paredes e na cúpula, conectados a uma placa-mãe responsável por emitir os valores de temperatura mensurados. As temperaturas são armazenadas em um sistema eletrônico e, via *software*, são visualizados gráficos ou tabelas cujas informações podem auxiliar no

controle da produção de carvão vegetal durante os processos de carbonização e resfriamento (OLIVEIRA, 2009). O autor afirma que a utilização de um sistema supervisor de monitoramento de temperatura auxilia na identificação e correção de desvios no processo de carbonização em tempo real, diminuindo as falhas operacionais, proporcionando o aumento da produtividade e diminuição da heterogeneidade do carvão vegetal.

O controle da carbonização por meio da mensuração da temperatura interna do forno por sensores portáteis de infravermelho tem sido mais utilizado devido ao seu menor custo em relação ao sistema supervisor. Neste caso, necessita-se da adaptação de cilindros metálicos nas paredes do forno, de forma a permitir a comunicação entre a parte interna do forno e o meio externo. O comprimento do cilindro deve ser igual à espessura da parede do forno, devendo a extremidade voltada para o interior ser fechada, evitando a entrada de ar não controlada.

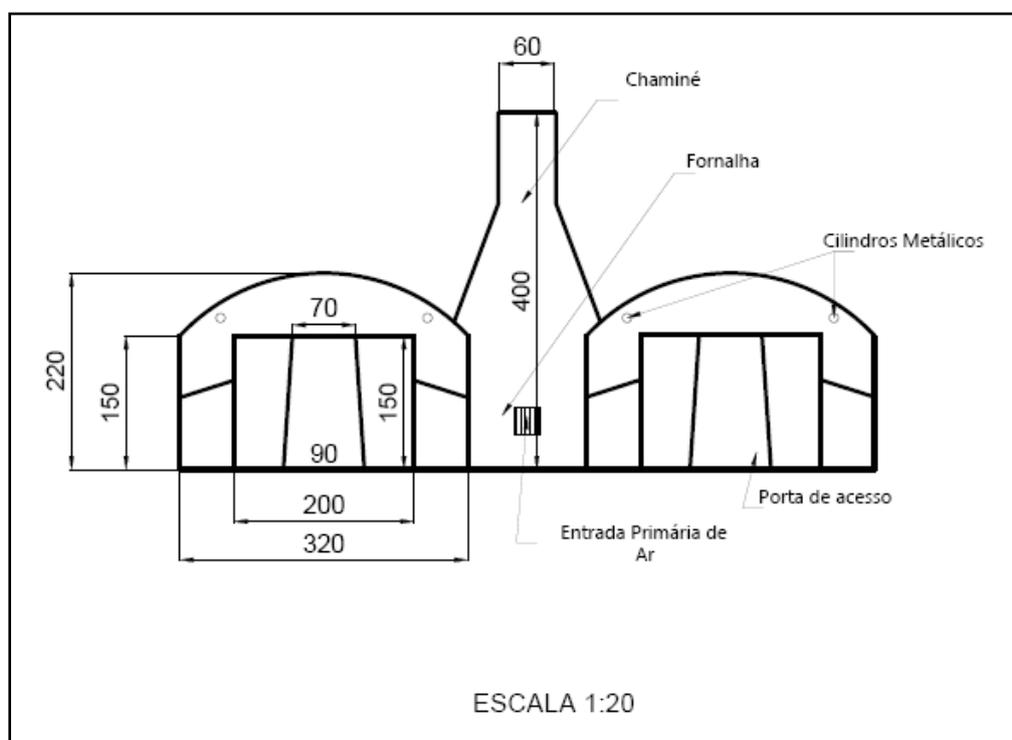
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado nas instalações do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM, do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa – UFV, situada na cidade de Viçosa, Minas Gerais.

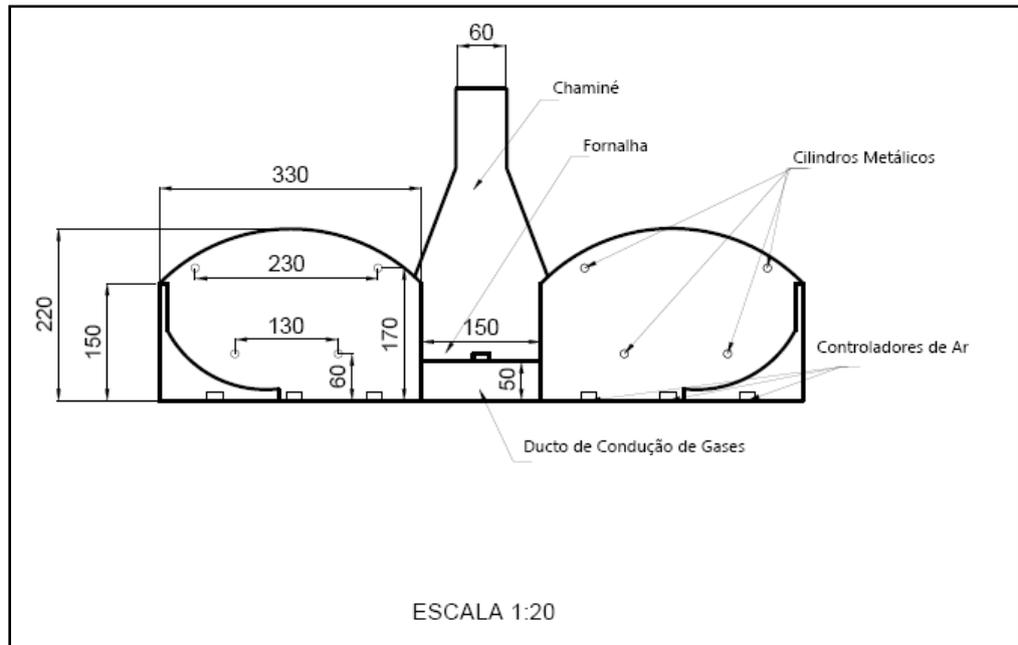
### 4.1 Projeto e construção do sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal

O forno no qual foram adaptados a fornalha e os ductos para condução dos gases é um forno circular de superfície, de alvenaria, dotado de seis controladores de ar na sua base. Optou-se por esse tipo de forno para receber os ductos e a fornalha por ser ele de baixo custo (Tabela 1A do Anexo), de fácil construção e bastante difundido entre os pequenos e médios produtores de carvão vegetal, principalmente no estado de Minas Gerais.

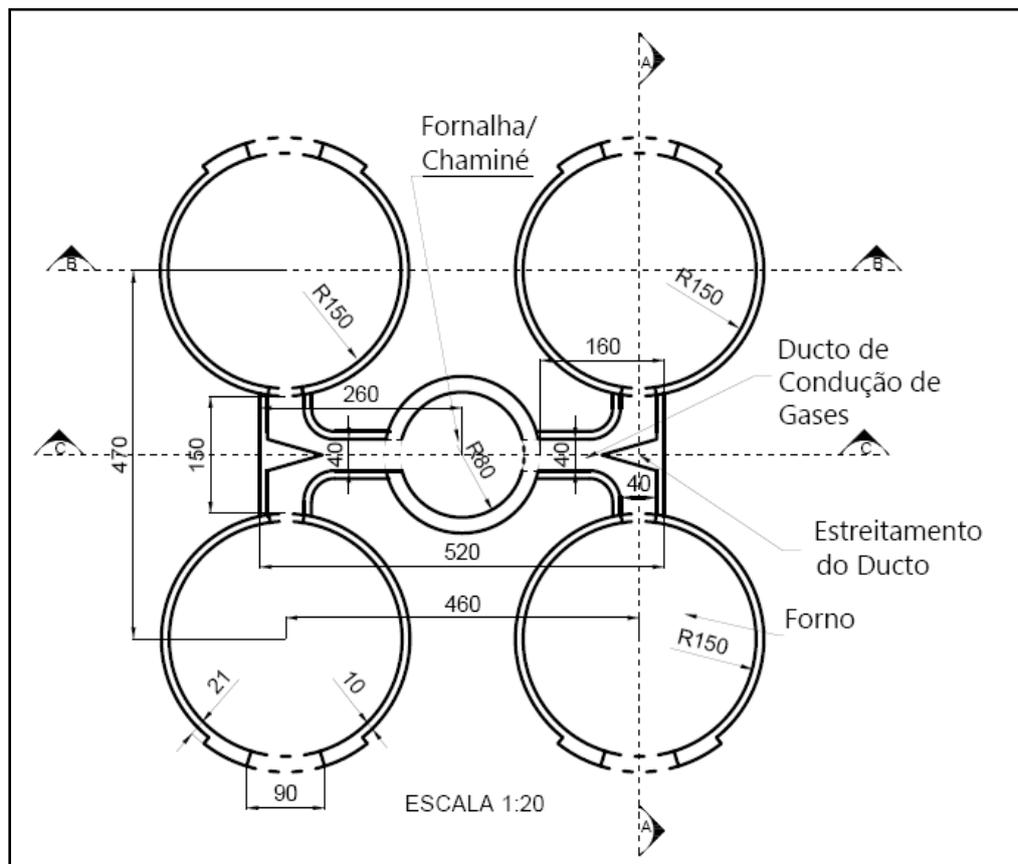
Nas Figuras 1, 2 e 3 e no Anexo 1 estão os detalhamentos e o projeto do sistema forno-fornalha.



**Figura 1** – Vista frontal do sistema forno-fornalha, com medidas em centímetros



**Figura 2** – Vista lateral do sistema forno-fornalha, com medidas em centímetros.



**Figura 3** – Planta baixa do sistema forno-fornalha, com medidas em centímetros.

#### **4.1.1 Construção do forno**

Inicialmente realizou-se o nivelamento do solo na área onde foi construído o sistema forno-fornalha.

Em seguida procedeu-se à marcação da base do forno para construção da parede lateral. Utilizou-se um cintel feito de madeira, que consiste de uma peça de madeira roliça fixada verticalmente no centro e de outra com 1,5 m de comprimento, amarrada horizontalmente à peça vertical.

A construção da base das paredes do forno consistiu na colocação de uma camada de tijolo maciço cerâmico, com 19 cm de comprimento, 9 cm de largura e 5,7 cm de altura de acordo com as normas ABNT NBR 7170 (ABNT, 1983) e NBR 8041 (ABNT, 1983), assentados com argamassa de solo argiloso, areia lavada e água.

Sobre a base construiu-se a parede em camadas simples, porém próximo à porta, para reforçar sua estrutura, a parede foi construída em camada dupla.

Na parte inferior do forno foram deixadas seis aberturas para entrada de ar, e conseqüentemente, para controle da carbonização. A porta do forno foi construída utilizando um gabarito de madeira de formato trapezoidal, com base maior de 90 cm, base menor de 70 cm e altura de 150 cm.

Finalizada a construção da parede do forno, cobrindo o vão da porta foi colocada uma cantoneira metálica em forma de “U” para auxiliar no suporte de sua cúpula e aumentar sua durabilidade. Em seguida, iniciou-se a construção da cúpula do forno, sendo os tijolos da parede e da cúpula colocados com as juntas desencontradas, para garantir maior resistência e estabilidade.

Após a deposição das primeiras camadas de tijolos da cúpula, uma cinta metálica com diâmetro de 3/8 polegada, unida por roscas e porcas, foi instalada externamente à parede do forno, para evitar a dilatação da parede no momento da carbonização, devido ao aumento da pressão interna causada pela geração de gases e calor no interior do forno.

#### **4.1.2 Construção da fornalha, ductos de condução dos gases e chaminé**

A fornalha adaptada ao forno é composta por um sistema de alimentação dos gases, câmara de combustão, sistema de admissão de ar primário e chaminé. Para a

construção da fornalha foram considerados o baixo custo, a facilidade de construção e a operação.

A fornalha foi construída em alvenaria, no formato cilíndrico, com abertura para passagem do ar comburente, com dimensões de 30 x 30 cm, situada a 40 cm do nível do solo. Essa abertura também foi utilizada para alimentação da fornalha com resíduos, quando da fase endotérmica da carbonização. O diâmetro interno e a altura da fornalha foram 160 e 110 cm, respectivamente. O volume da fornalha foi estimado, levando em consideração a vazão média dos gases de saída do forno igual a 2800 m<sup>3</sup>/h.

A parede da fornalha foi construída com camada dupla de tijolos maciços cerâmicos, assentados com argamassa de solo argiloso, areia lavada e água. O interior da fornalha foi revestido com manta cerâmica aderida com a mesma argamassa utilizada na construção, para maior durabilidade e manutenção do calor interno durante o processo de combustão dos gases.

A manta cerâmica utilizada foi a NAUTECIBAR HT, constituída de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(52 a 54%), SiO<sub>2</sub> (44 a 48%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,1 a 0,2%), TiO<sub>2</sub>(0,1 a 0,2%). As propriedades da manta são: limite máximo de uso a 1.482°C, limite contínuo de uso a 1.380°C, ponto de fusão a 1.760°C, diâmetro da fibra de 2,5µ, comprimento da fibra 178 mm e contração linear de 2,0% a 1.300°C por 24 horas (NUTECIBAR, 2007).

Na última camada de tijolos da parede da fornalha foi colocada, externamente, uma cinta metálica com diâmetro de 3/8 polegada, unida por roscas e porcas, para conferir maior resistência devido à expansão térmica gerada pela combustão de gases em seu interior.

O ducto para transporte dos gases da carbonização até a fornalha foi construído com tijolos maciços cerâmicos assentados com a mesma argamassa utilizada na construção do forno e da fornalha, com secção de 40 cm de largura, 40 cm de altura e comprimento médio de 150 cm. Na parte interna do ducto foi construído um estreitamento com tijolos, para direcionamento do fluxo de gases para a fornalha.

No local da saída de gases do forno pelo ducto foi instalada uma guilhotina feita de chapa de ferro com 55 x 50 cm e 3 mm de espessura, para controle da vazão de saída desses gases através da sua movimentação vertical.

Nessa configuração de sistema, a chaminé foi construída sobre a fornalha, com diâmetro interno inferior de 160 cm, superior de 40 cm e altura total de 400 cm, considerando a altura da fornalha (110 cm).

Finalizada a construção, a parte externa dos fornos, dos ductos, da fornalha e da chaminé foi revestida com uma camada de argamassa de areia lavada, cimento, argamassa refratária, cal virgem e água, com o objetivo de reduzir possíveis entradas de ar, perdas térmicas e também aumentar a durabilidade do sistema.

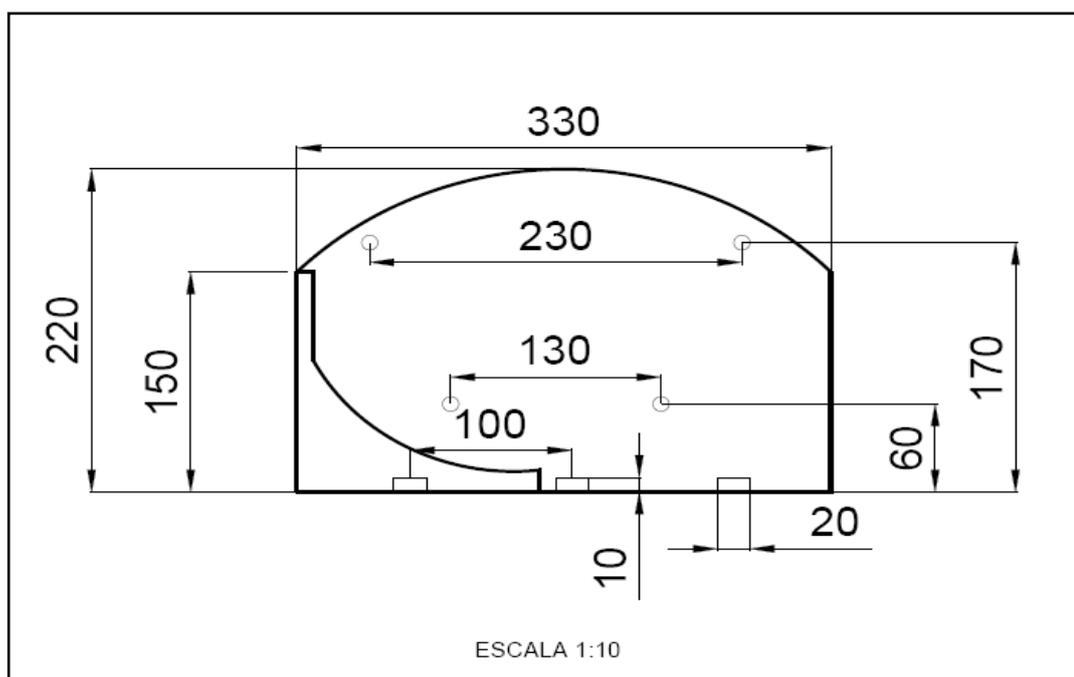
#### 4.2 Instalação dos cilindros metálicos

Para monitoramento da temperatura interna do forno durante a carbonização e o resfriamento, foram instalados cilindros metálicos para medição da temperatura por meio de um sensor de infravermelho. Esses cilindros possuem um diâmetro externo de 5 cm, diâmetro interno de 4,8 cm, espessura de parede de 0,1 cm e comprimento médio de 20 cm. Uma das extremidades do cilindro metálico foi fechada para fazer a comunicação da parte externa com o interior do forno e a outra permaneceu aberta, para inserção do medidor infravermelho de temperatura (Figura 4).

Foram instalados oito cilindros metálicos em cada forno, sendo quatro posicionados na cúpula a 170 cm acima do solo e quatro nas paredes laterais posicionados a 60 cm acima do nível do solo, instalados entre os controladores de ar, conforme observado na Figura 5.



**Figura 4** – (A) Vista da extremidade aberta do cilindro metálico; (B) Vista da lateral e da extremidade fechada do cilindro metálico; (C) Vista externa do cilindro metálico instalado na parede do forno.



**Figura 5** – Vista lateral do forno com o posicionamento dos cilindros metálicos, com medidas em centímetros

### 4.3 Propriedades da madeira

Para as carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus* spp. com 7 anos de idade, diâmetro variando de 10 a 30 cm e altura de 1,50 a 2,20 m, proveniente de plantio comercial com espaçamento 3x3, localizado na cidade de Viçosa-MG.

Para determinação das propriedades da madeira foram selecionadas 12 toras representativas das classes diamétricas verificadas no volume total de madeira. Dessas toras foram retirados discos nas posições de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura total. Cada disco foi dividido em quatro partes, tendo sido retiradas duas cunhas opostas para determinar a densidade básica; a madeira restante foi moída e peneirada, para determinação das demais propriedades.

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003) e Vital (1984). Os valores foram calculados a partir da média aritmética das densidades das respectivas cunhas.

O poder calorífico superior da madeira foi determinado conforme a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), em duplicatas, utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática. Utilizou-se a fração serragem da madeira que

passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982). As amostras foram secas em estufa a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ , até massa constante.

Para determinação da composição química da madeira foram utilizadas as amostras composta por tora, usando a fração que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982). A determinação do teor absolutamente seco da madeira foi realizada conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998).

Os teores de extrativos da madeira foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), substituindo o etanol/benzeno pelo etanol/tolueno.

Os teores de lignina insolúvel foram determinados em duplicata pelo método Klason modificado, de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), a partir da diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido pela soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel.

A porcentagem de cinzas na madeira foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), com modificações.

O teor de holoceluloses foi obtido pelo somatório dos teores de extrativos totais, lignina total e cinzas decrescido de 100.

Para o cálculo da umidade média, seis toras de madeira representativas da variação de diâmetro foram selecionadas para retirada de discos nas extremidades e na porção central da tora. Esses discos foram levados para estufa com circulação forçada de ar, a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ , onde permaneceram até atingir massa constante.

#### **4.4 Funcionamento do sistema forno-fornalha**

Para avaliar o funcionamento e o desempenho do sistema forno-fornalha com baixa emissão de poluentes para produção de carvão vegetal foram realizadas quatro carbonizações, no período de 1º de agosto de 2011 a 18 de setembro de 2011. Os dados meteorológicos desse período estão na Tabela 1

**Tabela 1**– Dados meteorológicos do período de 1º de agosto de 2011 a 20 de setembro de 2011

Carbonização	Período	Temperatura do Ar (°C)			Umidade Relativa do ar (%)	Chuva (mm)
		Média	Máxima	Mínima		
<b>1 - Ajuste</b>	02/08 a 07/08	18,1	25,6	13,3	74	0,2
<b>2</b>	10/08 a 15/08	18,0	27,1	12,5	71	0,0
<b>3</b>	29/08 a 03/09	17,4	26,2	12,2	73	0,0
<b>4</b>	13/09 a 18/09	18,7	25,7	14,5	70	0,0

Dados obtidos na Estação Meteorológica da Universidade Federal de Viçosa.

#### 4.4.1 Carregamento do forno

Antes do carregamento do forno, procedeu-se à limpeza dos controladores de ar, dos ductos de condução dos gases, da fornalha e da chaminé.

O carregamento do forno foi realizado manualmente, tendo a madeira sido posicionada verticalmente, até a altura de 1,5 m. Na parte superior do forno, a madeira foi colocada na posição vertical, para redução de espaços vazios e melhor aproveitamento do espaço interno do forno.

Após o carregamento do forno a porta foi fechada com tijolo maciço cerâmico e argamassa de solo argiloso, areia e água. Uma abertura de 30 cm de comprimento e 5 cm de espessura foi deixada na parte superior da porta, para ignição do forno.

#### 4.4.2 Ignição e controle da carbonização

Durante a ignição do forno todos os controladores de ar e a guilhotina permaneceram abertos.

O controle da carbonização foi realizado pelo monitoramento da temperatura, pelo controle da entrada de ar (oxigênio) para dentro do forno através da sua abertura ou do fechamento com tijolo e pela saída dos gases originários da degradação térmica da madeira pelo ducto de condução dos mesmos do forno para a fornalha.

A temperatura do forno foi monitorada a partir dos oito cilindros metálicos instalados, usando um sensor infravermelho de temperatura modelo TD 980, marca ICEL, apropriado para temperaturas de -50°C a 1050°C. Um termopar tipo K foi posicionado no ducto de condução dos gases, com o objetivo de medir a temperatura de saída dos gases do forno direcionados para a fornalha.

De acordo com as temperaturas obtidas, principalmente na parte superior do forno, procedeu-se o fechamento ou a abertura das entradas de ar, e conseqüentemente, o controle da carbonização em função das faixas de degradação térmica da madeira, tendo como meta a temperatura máxima final de carbonização média de 470°C.

#### **4.4.3 Combustão dos gases da carbonização na fornalha**

Após a ignição do forno realizou-se o acendimento da fornalha, que estava abastecida com resíduos lignocelulósicos. Abastecimentos posteriores foram necessários para manter a chama acesa e elevar a temperatura na fornalha.

Quando os gases gerados durante a carbonização da madeira no forno atingiram  $\pm 120^{\circ}\text{C}$ , o abastecimento da fornalha com resíduos foi suspenso, pois os gases gerados foram capazes de manter a combustão. Deste momento até próximo ao fim da carbonização, quando ocorreu a diminuição no volume de gases liberados, a chama dentro da câmara de combustão da fornalha permaneceu acesa.

Para controle da combustão de gases na fornalha, a abertura de alimentação e entrada de ar permaneceu parcialmente fechada com tijolo maciço cerâmico, para reduzir a entrada de oxigênio, mantendo a queima mais lenta, e obter uma combustão completa. Os tijolos foram retirados somente no momento do abastecimento da fornalha com resíduos.

#### **4.4.4 Resfriamento do forno**

Ao final do processo de carbonização, quando o volume de gases e a temperatura interna do forno diminuía, procedeu-se seu fechamento total, para início da etapa de resfriamento. A vedação total do forno foi realizada, fechando-se os controladores de ar e descendo a guilhotina até ao nível do solo, evitando a entrada de oxigênio para o interior do forno.

O resfriamento do forno foi natural, não utilizando nenhum procedimento para redução do tempo dessa etapa. Durante o resfriamento, as temperaturas internas do forno foram obtidas a partir dos oito cilindros de medição, por meio do uso de medidor infravermelho de temperatura.

#### 4.4.5 Abertura e descarregamento do forno

Após o resfriamento do forno procedeu-se à abertura da porta para o descarregamento do carvão, o que foi feito com garfo metálico apropriado, colocando-o então em sacos de rafia de aproximadamente 50 litros, para pesagem e determinação do rendimento gravimétrico. Durante o descarregamento o carvão vegetal com granulometria inferior a 12,7 mm (finos) foi separado, pesado e ensacado. A madeira parcialmente carbonizada (atiços) foi separada manualmente e pesada.

#### 4.5 Rendimento gravimétrico da carbonização

As massas de carvão vegetal, finos e áticos foram determinadas e o rendimento gravimétrico calculado pelas seguintes fórmulas:

$$RGC = 100 \times \frac{Mc}{Mms}$$

**em que:**

RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%);

Mc = massa de carvão vegetal (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 atíço (%);

Mt = massa de atíço (kg); e

Mms = massa de madeira seca (kg)

#### 4.6 Amostragem e propriedades do carvão vegetal

Baseando-se na norma ABNT NBR 6923 (ABNT, 1981), após a pesagem do carvão, foram sorteados seis sacos, que foram colocados em uma lona, homogeneizados e quarteados; de um quarto retirou-se uma alíquota de 20 litros, para determinação das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal.

A densidade a granel foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981).

A densidade relativa aparente foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 9195 (ABNT, 1985).

Para determinação do poder calorífico superior e composição química imediata, as amostras de carvão vegetal foram moídas e peneiradas, classificadas em peneira de 60 mesh e posteriormente secas em estufa a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ , até massa constante, conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981).

O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi determinado por meio da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ABNT NBR 8633 (ABNT, 1983).

A determinação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) seguiu os procedimentos preconizados na norma NBR 8112 (ABNT, 1983), com algumas adaptações.

Determinou-se também o teor de umidade, base seca. Para tanto, amostras de várias dimensões de carvão foram pesadas e levadas à estufa com circulação forçada de ar, a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ , até atingirem massa constante.

A determinação da friabilidade do carvão foi realizada segundo a metodologia sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), para carvão vegetal, citado por Oliveira *et al.* (1982), adaptada, utilizando uma amostra de 130 grs. de carvão vegetal, com granulometria inferior a 60 mm e superior a 20 mm, utilizando friabilômetro modelo MA-791.

#### 4.7 Perfil térmico

As temperaturas internas do forno obtidas por meio de medidor infravermelho de temperatura foram registradas em intervalos de 30 em 30 minutos durante todo o processo de carbonização e em intervalo de 8 em 8 horas para a etapa de resfriamento.

A partir das temperaturas médias obtidas dos quatro pontos de medição da cúpula e dos quatro pontos instalados nas paredes do forno, procedeu-se a confecção do perfil térmico da carbonização.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Propriedades da madeira

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

A densidade básica da madeira utilizada nas carbonizações realizadas no sistema forno-fornalha foi de 420 kg/m<sup>3</sup>, valor considerado baixo quando comparado ao dos materiais genéticos plantados para produção de carvão vegetal. A carbonização de madeira de baixa densidade, associada com a perda média de 65% da massa, resulta em carvão de baixa densidade. Logo, densidades básicas da madeira superior a 500 kg/m<sup>3</sup> são consideradas satisfatórias para a conversão da madeira em carvão vegetal. A utilização de madeira de baixa densidade foi devido à indisponibilidade de matéria-prima adequada na época de realização deste trabalho.

Rocha (2011), estudando a influência do espaçamento e da idade nas propriedades de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*, observou valores superiores aos verificados neste trabalho. Na idade de 7 anos, o híbrido apresentou valor médio de 540 kg/m<sup>3</sup> de densidade básica. Maiores valores de densidade também foram observados por Soares (2011), que encontrou 545 kg/m<sup>3</sup> para híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 7 anos. As autoras obtiveram maiores valores de densidade, pois os híbridos avaliados são originários de plantios florestais para produção de madeira para a conversão em carvão vegetal, ou seja, trata-se de material genético selecionado.

O poder calorífico superior (PCS) é a propriedade que determina a quantidade de calor produzido durante a combustão completa de uma unidade de massa, sofrendo influência das características intrínsecas do material.

O PCS médio das madeiras carbonizadas neste trabalho foi de 4.613 kcal/kg, valor superior aos encontrados por Rocha (2011), que obteve o valor de 4.391 kcal/kg como média geral dos indivíduos de 7 anos. O PCS igual a 4.629 kcal/kg encontrado por Pereira (2011), para *E. urophylla*, aos 7 anos, foi próximo ao encontrado neste trabalho.

Pereira (2011) e Rocha (2011), estudando a madeira de eucalipto proveniente de plantios florestais para produção de carvão vegetal, obtiveram valores médios de teor de lignina de 30,87 e 31,56%, respectivamente, sendo esses superiores ao encontrado neste trabalho, em que se obteve um valor médio de 27,86%. O teor de holoceluloses verificado neste trabalho foi de 72,14%, valor superior a 67,62% de holoceluloses encontrado por Pereira (2011) e 65,97% obtido por Rocha (2011).

Trugilho *et al.* (2001), avaliando espécies de *Eucalyptus* com 7 anos, objetivando a seleção de clones para produção de carvão vegetal, consideraram como espécies superiores aqueles indivíduos com melhores fatores de crescimento e porcentual de extrativos variando entre 4 e 6,5%. A madeira carbonizada neste trabalho apresentou 4,46% de teor de extrativos.

O teor de cinzas da madeira foi igual a 0,36%, valor este inferior a 1%, como esperado para a madeira de eucalipto.

A umidade da madeira utilizada nas carbonizações realizadas no sistema forno-fornalha variou de 41,25 a 44,86%, obtendo-se como valor médio 42,51%. A umidade da madeira acima de 30% eleva o tempo de carbonização, devido à necessidade de secagem da madeira no interior do forno para depois ser iniciada a carbonização propriamente dita, além de ocasionar o consumo de parte da madeira enfiada para fornecimento da energia necessária para a evaporação da água.

## 5.2 Faixas teóricas de carbonização

Na produção de carvão vegetal utilizando fornos conectados a uma fornalha não é possível o controle da carbonização pela coloração dos gases, pois eles são queimados liberando CO<sub>2</sub>, calor e vapor de água, quando a combustão é completa. Logo, foi necessário obter as temperaturas e o tempo para a carbonização da madeira, de modo a obter maior rendimento gravimétrico em carvão.

Na Tabela 2 estão as faixas teóricas de temperatura obtidas para o controle da carbonização da madeira nesse sistema forno-fornalha. Elas foram obtidas após a realização de testes preliminares, com base no tempo total de carbonização (70 horas), na constituição química da madeira e na degradação térmica dos seus principais componentes.

**Tabela 2** – Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização no sistema forno-fornalha, mensuradas na cúpula do forno

Fase	Faixa de Temperatura	Tempo Manutenção	Fenômeno
I	100-150°C	15-16 horas	Liberação de vapor de água – secagem da madeira, fase endotérmica
II	150-275°C	11-12 horas	Degradação das hemiceluloses, eliminação de gases, fase endotérmica
III	275-400°C	23-24 horas	Degradação da celulose, grande produção de gases, fase exotérmica. Formação do carvão vegetal
IV	400-470°C	17-18 horas	Redução da emissão de gases, fase exotérmica. Aumento da concentração de carbono no carvão vegetal

As faixas de temperatura foram obtidas considerando principalmente a temperatura mensurada na parte superior do forno, visto que a temperatura média da parte inferior do forno esteve abaixo desses valores. Mas para maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal, as temperaturas obtidas na parte inferior, ou seja, mensuradas na parede do forno, devem estar próximas das temperaturas observadas na parte superior.

Observa-se, na Tabela 2, que a fase endotérmica teve duração média de 28 horas (40% do tempo total de carbonização), enquanto a fase exotérmica durou 42 horas, correspondendo a 60% do tempo de carbonização no sistema forno-fornalha.

O tempo de manutenção para a etapa de secagem da madeira foi de aproximadamente 16 horas (23% do tempo total de carbonização) para madeira com umidade média de 42,5%, base seca. Ressalta-se que a umidade da madeira tem grande influência sobre essa etapa, pois quanto maior a umidade inicial maior será o tempo necessário para eliminação de toda a água, acarretando assim no aumento da fase endotérmica do processo. De acordo com Arruda *et al.* (2011), a fase de secagem da madeira empregada na produção de carvão vegetal ocorre no interior do forno nos intervalos de temperatura de 110 a 200°C. Nesta etapa, nos sistemas autotérmicos, ocorre o consumo de parte da madeira enfiada para evaporação da água, sendo o processo endotérmico.

Havendo a possibilidade de utilizar madeira com umidade menor que 42,5%, o tempo dessa primeira etapa poderá ser reduzido, fato que acarretaria na diminuição do tempo total de carbonização, elevando a produtividade do sistema forno-fornalha.

Na variação de temperatura de 150 a 275°C ocorre maior degradação das hemiceluloses e menor degradação da celulose e lignina. Esta fase apresenta menor tempo de duração, 12 horas (17% do tempo total de carbonização), uma vez que nessa faixa de temperatura ocorre a degradação das hemiceluloses, polímero menos estável termicamente que os demais, e que, segundo Sjöström (1993), constituem de 20 a 30% da madeira. As ramificações presentes nas hemiceluloses são facilmente removidas da cadeia principal e degradam-se em compostos voláteis, como CO, CO<sub>2</sub> e alguns hidrocarbonetos, em baixas temperaturas (YANG *et al.*, 2007).

Nessa segunda fase de carbonização o processo ainda é endotérmico, ou seja, a energia requerida para a quebra das estruturas químicas dos componentes da madeira é maior que a energia liberada.

A celulose constitui cerca de 40 a 50% da massa seca de madeira e, segundo Yang *et al.* (2007), sua degradação térmica máxima ocorre na temperatura de 355°C. Portanto, a faixa de temperatura e o tempo de manutenção propostos neste trabalho, que compreende a temperatura de degradação da celulose, variaram de 275 a 400°C. Por ser a celulose o constituinte presente em maior massa na madeira, essa fase teve maior duração, em torno de 24 horas, correspondendo a 34% do tempo total de carbonização. Ressalta-se que a partir dessa fase ocorrem as principais reações exotérmicas do processo, havendo elevada liberação de CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (TACCINI, 2011).

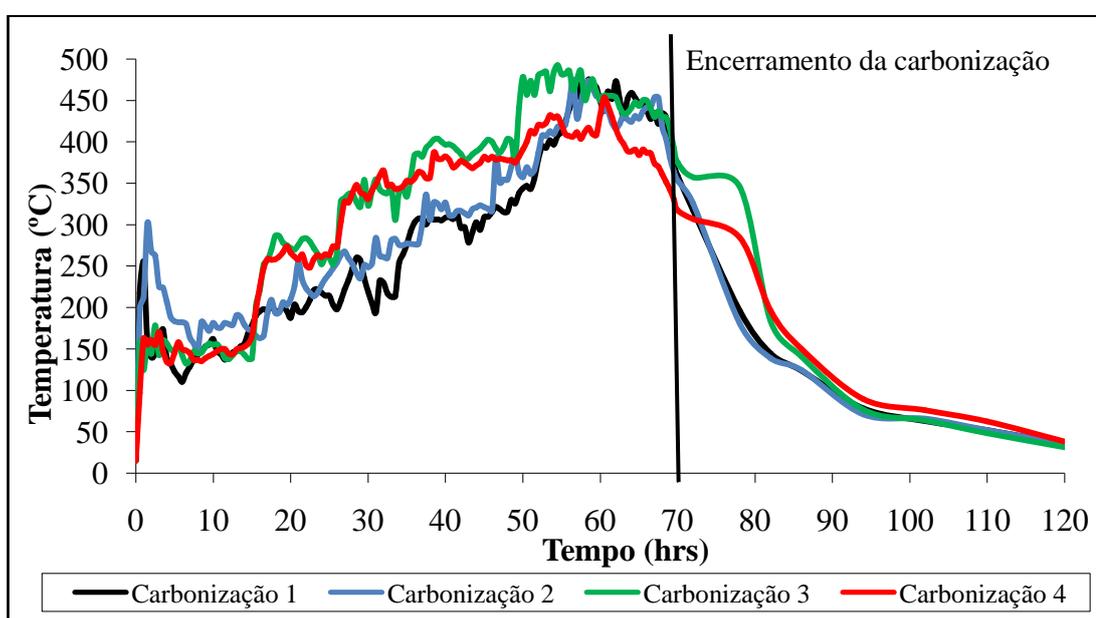
Na quarta e última fase, a temperatura média variou de 400 a 470°C e teve duração média de 18 horas (26% do tempo de carbonização). Nessas condições verificase a ocorrência da maior degradação térmica da lignina. Segundo Frederico (2009), 50% do carbono fixo presente no carvão vegetal é devido à degradação da lignina. Nessa fase ocorreu a redução da vazão dos gases em função da redução dos compostos voláteis e fixação do carbono fixo no carvão vegetal. Vale ressaltar que a maior temperatura final de carbonização proporciona o aumento do carbono fixo no carvão vegetal com a diminuição do teor de materiais voláteis e redução no rendimento gravimétrico em carvão (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Visando aumentar a produtividade do sistema e não havendo necessidade de carbono fixo acima de 80%, pode-se diminuir o tempo de manutenção da quarta fase de carbonização, assim como reduzir o limite de temperatura de 470 para 450°C.

### 5.3 Perfil térmico do forno

Arruda *et al.* (2011) ressaltaram que a determinação da temperatura interna do forno permite a obtenção do perfil térmico da carbonização e do resfriamento condizentes com os fenômenos que realmente ocorrem. Estas informações são utilizadas para o melhor controle dos processos, resultando em maior rendimento gravimétrico da carbonização e melhoria da qualidade do carvão vegetal.

A Figura 6 representa a variação da temperatura média da cúpula do forno observada durante as quatro carbonizações realizadas.



**Figura 6** – Temperaturas médias da cúpula do forno durante as carbonizações.

Durante a primeira carbonização o forno permaneceu 35 horas exposto a temperaturas inferiores a 275°C, quando o desejado seria 28 horas, conforme estabelecido na Tabela 3. Na faixa de temperatura variável de 275 a 400°C (terceira fase), o tempo de exposição foi de 19 horas, tempo inferior ao necessário para que ocorressem as reações necessárias para a carbonização da madeira. Na última fase da carbonização, cuja temperatura máxima deve ser inferior ou igual a 470°C, o tempo total de exposição foi de 16 horas. Para esta carbonização, a temperatura máxima (476°C) medida na cúpula do forno ocorreu na 59ª hora.

Para a segunda carbonização foram abertos dois novos controladores de ar próximo à porta para aumentar a entrada de oxigênio no interior do forno e, assim, haver maior incremento da temperatura do forno durante a carbonização da madeira.

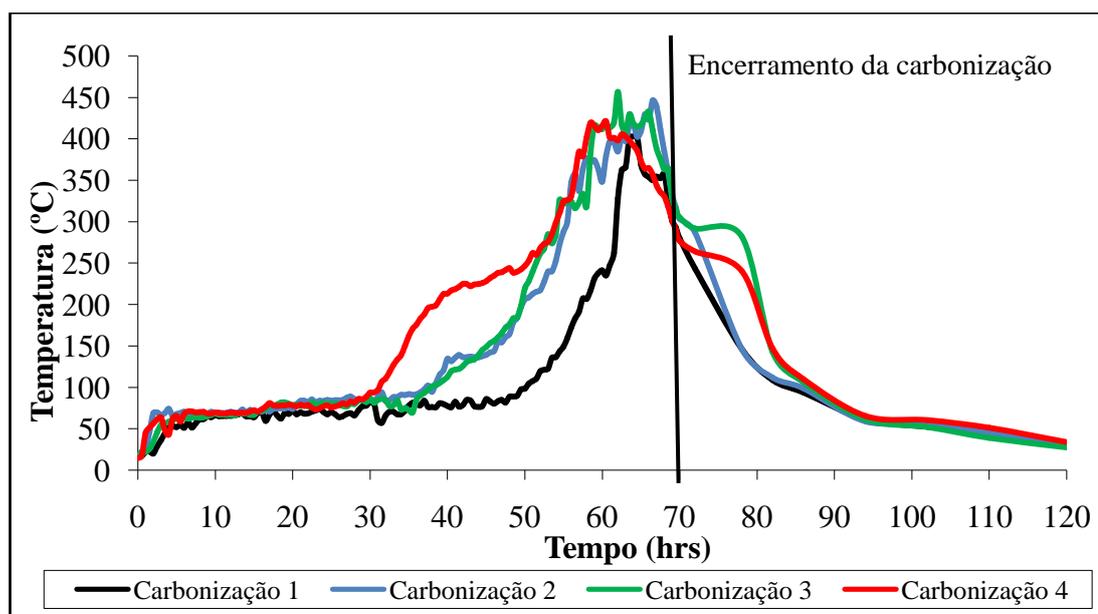
Dessa forma, mesmo essa carbonização permanecendo 34 horas nas duas primeiras fases de carbonização (temperatura de 100 a 275°C), 19 horas na terceira fase e 17 horas na última fase, as temperaturas foram superiores às verificadas na primeira carbonização, conforme verificado na Figura 6. Após 56 horas da ignição do forno a temperatura máxima igual a 476°C foi alcançada para a segunda carbonização.

Para alcançar as metas de tempo e temperatura estabelecidas, durante a terceira carbonização os seis controladores de ar foram deixados com abertura maior do que aquelas das carbonizações anteriores. Assim, a fase de secagem da madeira, quando a temperatura não deveria ultrapassar 150°C, teve duração média de 15 horas, enquanto a segunda fase de carbonização, quando a temperatura varia entre 150 e 275°C, teve duração média de 11 horas. Observa-se que nessa carbonização o forno permaneceu menos tempo na fase endotérmica, cerca de um terço do tempo total, em comparação com as carbonizações anteriores, que permaneceram por 35 horas, ou metade do tempo total.

Em relação às fases exotérmicas, verificou-se que a terceira fase, quando a temperatura apresenta variação entre 275 e 400°C, foi mantida por 23 horas. A fase de fixação do carbono no carvão vegetal (quarta fase) ocorreu durante 22 horas, sendo a temperatura máxima dessa carbonização (486°C) alcançada após 56 horas do início da carbonização.

Para a quarta carbonização, a fase de secagem da madeira, quando a temperatura deve permanecer entre 100 e 150°C, teve duração de 15 horas, enquanto para a segunda fase, variação da temperatura entre 150 e 275°C, o tempo de exposição foi de 11 horas. A terceira fase ocorreu durante 24 horas e a última, com temperatura variando de 400 a 470°C, ocorreu da 51ª hora de carbonização até o fim do processo (19 horas), quando a temperatura do forno decresceu de maneira natural. A temperatura máxima igual a 455°C foi alcançada na cúpula do forno após 60 horas do início da carbonização.

A Figura 7 representa a variação da temperatura média da parede do forno observada durante as quatro carbonizações realizadas.



**Figura 7** – Temperaturas médias da parede do forno durante as carbonizações.

Para que a carbonização apresente satisfatório rendimento gravimétrico de carvão vegetal com baixa geração de atíço e finos, as temperaturas medidas na parte inferior do forno, ou seja, na parede, devem estar próximas das temperaturas da cúpula do forno.

Durante a primeira carbonização a temperatura média da parte inferior do forno permaneceu abaixo de 100°C até a 50ª hora de carbonização, e somente após 57 horas de carbonização é que a temperatura ultrapassou os 200°C, alcançando a temperatura máxima igual a 403°C após 64 horas do início do processo. De acordo com a Figura 7, essa carbonização apresentou temperaturas inferiores às demais carbonizações realizadas neste trabalho.

Para a segunda carbonização, observou-se que na parede do forno a temperatura média de 100°C foi alcançada a partir da 40ª hora. Portanto, para essa carbonização a parte inferior do forno permaneceu menos tempo a temperaturas inferiores a 100°C, quando comparado com a primeira carbonização. Temperaturas superiores a 300°C na parte inferior do forno foram alcançadas a partir da 55ª hora, com a temperatura máxima de 447°C ocorrendo na 66ª hora.

A parte inferior do forno a partir da 38ª hora da terceira carbonização atingiu temperaturas acima de 100°C, enquanto temperaturas superiores a 300°C foram mantidas da 54ª hora até o encerramento da carbonização (70ª hora), ou seja, manteve-se por 16 horas. Para essa carbonização ainda houve diferença significativa de

temperatura entre a parte inferior e a parte superior do forno, assim como nas carbonizações anteriores.

Para a quarta carbonização, temperaturas inferiores a 100°C na parte inferior do forno permaneceram até a 31ª hora de carbonização. A partir da 54ª hora, as temperaturas medidas na parede do forno foram superiores a 300°C, permanecendo até a 70ª hora, quando a carbonização foi encerrada. Devido ao maior incremento da temperatura na parede do forno, a quarta carbonização apresentou a menor geração de atíço (3,28%), em relação às demais carbonizações, conforme verificado na Tabela 4.

Para as carbonizações realizadas neste trabalho, o término da carbonização ocorreu na 70ª hora, momento em que cessou o fluxo de gases do forno para a fornalha e a temperatura do forno diminuiu naturalmente. Nesse momento, realizou-se o fechamento de todas as entradas de ar, bem como sua vedação com argamassa de solo argiloso, areia e água.

O resfriamento ocorreu de maneira natural, mediante a simples troca de calor do forno com o ambiente, até que a temperatura interna do forno medida tanto na cúpula quanto na parede do forno atingisse média inferior a 40°C, temperatura que assegura a abertura do forno e a descarga do carvão vegetal sem riscos de incêndio.

O tempo médio de resfriamento foi de 50 horas. Ressalta-se que esse tempo foi devido às baixas temperaturas do ambiente na época de realização das carbonizações, conforme apresentado na Tabela 1; a temperatura média foi de 18,0°C, com mínima de 12,2°C e máxima de 27,2°C.

#### **5.4 Eficiência da fornalha**

O principal objetivo do acoplamento de uma fornalha a um sistema de produção de carvão vegetal é realizar a queima dos gases gerados no forno durante a carbonização da madeira, reduzindo, assim, as emissões de gases para a atmosfera e transformando a poluição em calor.

Na Tabela 3 estão os valores médios dos parâmetros de funcionamento da fornalha em cada faixa de carbonização.

**Tabela 3** – Valores médios dos parâmetros de funcionamento da fornalha em cada faixa de carbonização

Parâmetro	Faixa de carbonização			
	I	II	III	IV
Temperatura da cúpula do forno	145°C	260°C	375°C	430°C
Temperatura da parede do forno	60°C	80°C	170°C	345°C
Temperatura de saída dos gases do forno	30°C	55°C	160°C	250°C
Temperatura de saída dos gases na chaminé	260°C	300°C	400°C	440°C
Consumo de resíduo (massa seca)	500 kg	300 kg	100 kg	200 kg

Para melhor desempenho do sistema forno-fornalha verificou-se que o acendimento da fornalha deveria ocorrer simultaneamente à ignição do forno. Para isto, a fornalha foi abastecida com resíduos, como madeira apodrecida, atijo gerado em carbonizações anteriores e resíduos lignocelulósicos gerados durante a colheita das árvores. O mesmo procedimento foi realizado por Cardoso *et al.* (2011), que relatam que o objetivo seria aquecer a fornalha e criar um gradiente de temperatura entre ela e o forno, fazendo com que ocorresse uma tiragem mais eficiente dos gases do forno para a fornalha.

Segundo Taccini (2011), do início da carbonização até o forno atingir temperatura média de 280°C na cúpula do forno, o que corresponde às fases I e II da carbonização, o processo é endotérmico, ocorrendo liberação de vapor de água e CO<sub>2</sub>. Portanto, até a 28ª hora de carbonização foi necessária a queima de grande quantidade de resíduos lignocelulósicos dentro da fornalha, totalizando 800 kg, para fornecimento de energia para combustão dos gases de baixo poder calorífico e alta umidade. Este procedimento foi imprescindível para evitar a liberação de grande volume de gases, principalmente vapor de água, para o ambiente, reduzindo assim a poluição visual durante a produção de carvão vegetal.

Durante a terceira fase de carbonização, quando a temperatura média da cúpula do forno atingiu 375°C e a temperatura média da parede do forno alcançou temperatura igual a 170°C, verificou-se que os gases de saída do forno estavam na temperatura de 160°C. Segundo Taccini (2011), nessas condições ocorre emissão mínima de vapor de água e elevam-se as concentrações de CO e CH<sub>4</sub>. Portanto, o abastecimento da fornalha com resíduos pode ser suspenso, pois os gases gerados são inflamáveis e de elevado

poder calorífico, passando a exercer a função de combustível para a combustão no interior da fornalha.

A queima dos gases na fornalha ocorreu durante 36 horas, tendo sido necessário abastecer a fornalha durante as primeiras horas até que o volume de gases com alto poder calorífico fosse suficiente para manutenção da chama, por isso o consumo de 100 kg de resíduos durante a terceira fase de carbonização. A queima de gases combustos da carbonização ocorreu durante 24 horas, sem a necessidade de abastecimento, ou seja, durante 34% do tempo total de carbonização.

Durante a queima dos gases no interior da fornalha foram obtidas temperaturas variando de 650 a 1150°C, sendo essa faixa de temperatura suficiente para promover a combustão completa do alcatrão, do licor pirolenhoso, dos fenóis e dos gases CO e CH<sub>4</sub>, transformando-os em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, conforme atestado por Cardoso *et al.* (2011).

Verificou-se ao final da carbonização, fase IV, que o volume de gases foi reduzido, sendo necessários novos abastecimentos com resíduos para manutenção da chama e combustão dos gases. A partir da 60<sup>a</sup> hora de carbonização, em intervalos de 4 horas, a fornalha foi abastecida com maior volume de resíduos para criar um gradiente de temperatura e pressão entre a fornalha e o forno para realizar a tiragem final dos gases de dentro do forno até cessar a carbonização, resultando no gasto de 200 kg de resíduo.

Quando se encerrou a carbonização, a chama no interior da fornalha estava enfraquecida, sendo necessário somente o fechamento e a vedação da entrada primária de ar para finalização da combustão na fornalha.

## **5.5 Rendimento gravimétrico das carbonizações**

Os rendimentos gravimétricos obtidos nas carbonizações realizadas no sistema forno-fornalha estão na Tabela 4.

**Tabela 4** – Rendimentos gravimétricos de carvão vegetal, atíço e finos no sistema forno-fornalha

Carbonização	Rendimento (%)			Umidade da Madeira (%)
	Carvão	Atíço	Finos	
<b>1 - Ajuste</b>	26,40	21,60	4,10	41,25
<b>2</b>	32,15	12,42	3,14	42,67
<b>3</b>	31,80	10,83	3,54	44,86
<b>4</b>	35,61	3,28	3,02	41,28
<b>Média*</b>	<b>33,18</b>	<b>8,85</b>	<b>3,23</b>	<b>42,51</b>
<b>CV (%)*</b>	<b>5,17</b>	<b>45,06</b>	<b>6,86</b>	<b>4,00</b>

\* Média e coeficiente de variação (CV) determinados apenas para as carbonizações 2, 3 e 4.

O rendimento em carvão vegetal da primeira carbonização (Ajuste) realizada no sistema forno-fornalha foi de 26,40%, valor considerado baixo, uma vez que o esperado seria no mínimo 30%, sendo, então, elevado o percentual de atíço gerado, 21,60%. Este fato foi ocasionado pelo elevado tempo de exposição da madeira (50% do tempo de carbonização) em temperaturas inferiores a 300°C, não ocorrendo a conversão da madeira em carvão vegetal. As peças de madeira semicarbonizadas (atíço) tiveram, nessa carbonização, tamanho variável de 30 a 45 cm, localizando-se na parte central do forno e próximo à porta. O percentual de finos nessa carbonização foi inferior a 5%, provavelmente devido ao controle adequado da temperatura, realizado por meio da utilização de medidor de infravermelho, não sendo verificadas temperaturas superiores a 480°C durante a carbonização.

Para a segunda carbonização obteve-se rendimento gravimétrico em carvão vegetal de 32,15%, com menor produção de atíço (12,42%), estes gerados na parte central do forno e com tamanho variando de 20 a 30 cm. A maior porcentagem de carvão vegetal foi devido à abertura de dois novos controladores de ar próximo à porta e manutenção do forno em temperaturas mais próximas ao limite superior definido para cada faixa teórica.

Na terceira carbonização, o rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi igual a 31,80%, valor próximo ao alcançado na segunda carbonização, porém com pequena redução na porcentagem de atíço (10,83%). Apesar da redução do percentual de atíço nessa carbonização, ele ainda foi considerado elevado, ou seja, insatisfatório para o sistema, pois como o controle foi baseado em faixas ideais de carbonização e o controle

da temperatura do forno efetuado por meio de sensor de infravermelho, esperava-se um valor inferior a 5%.

Visando reduzir o percentual de atíço e elevar o percentual de carvão vegetal, na quarta carbonização, além do cumprimento das faixas de carbonização, aumentou-se o tempo de abertura dos controladores de ar após a chegada da frente de carbonização. Os controladores próximos à porta ficaram abertos durante 10 horas, os controladores centrais durante 11 horas e os mais próximos à saída de gases ficaram abertos por 9 horas. Essas modificações promoveram o aumento do rendimento gravimétrico em carvão vegetal para 35,61% e a redução do percentual de atíço para 3,28%. O comprimento máximo dos atíços gerados nessa carbonização foi de 10 cm, localizando-se principalmente na parte central do forno.

Nas carbonizações com controle realizado com base nas faixas de tempo e temperatura apresentadas na Tabela 2, verificou-se que o sistema forno-fornalha proporcionou rendimento gravimétrico médio em carvão vegetal de 33%, sendo esse considerado satisfatório, pois os atuais fornos de carvão vegetal apresentam rendimento médio de 28 a 30%. Em fornos de alvenaria do tipo “rabo-quente” o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, geralmente, alcança máximo de 25%. Cardoso (2010) obteve rendimento médio de 29% de carvão vegetal e 4% de atíço em carbonizações realizadas no forno MF1-UFV.

Arruda *et al.* (2011) obtiveram 28,5% de rendimento em carvão vegetal para madeira com 48% de umidade, para carbonizações realizadas em fornos retangulares. Já Assis (2007) obteve rendimento gravimétrico médio de 33% em um sistema para carbonização da madeira que consistia de uma unidade de carvoejamento metálica, uma unidade isolante em alvenaria e uma câmara de combustão externa.

O valor médio de 8,85% de atíço para esse sistema forno-fornalha foi considerado elevado, com possibilidade de redução do seu valor, o que reflete no aumento do rendimento gravimétrico em carvão vegetal, como foi verificado na quarta carbonização deste trabalho. Para tal, basta manter os controladores de ar mais tempo abertos após a chegada da frente de carbonização e cumprir os tempos e as temperaturas estabelecidos, buscando manter a temperatura média mais próxima do limite superior.

## **5.6 Propriedades do carvão vegetal**

Na Tabela 5 estão os valores médios das propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal produzido no sistema forno-fornalha.

**Tabela 5** – Valores médios das propriedades físicas, químicas e mecânica do carvão vegetal produzido no sistema forno-fornalha

Carbonização	Densidade Granel (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	PCS (kcal/kg)	Umidade (%)	MV (%)	CZ (%)	CF (%)	Friabilidade (%)
<b>1- Ajuste</b>	179	313	8091	6,78	16,21	0,65	83,14	16,27
<b>2</b>	178	300	8131	5,07	17,31	0,97	81,72	18,95
<b>3</b>	181	310	8089	4,56	16,64	1,19	82,16	13,12
<b>4</b>	184	326	8123	4,17	17,26	0,84	81,90	13,78
<b>Média*</b>	<b>181</b>	<b>312</b>	<b>8114</b>	<b>4,60</b>	<b>17,07</b>	<b>1,00</b>	<b>81,93</b>	<b>15,28</b>
<b>CV (%)*</b>	<b>3,16</b>	<b>5,97</b>	<b>0,63</b>	<b>15,02</b>	<b>4,27</b>	<b>21,66</b>	<b>0,72</b>	<b>19,76</b>

\* Média e coeficiente de variação (CV) determinados apenas para as carbonizações 2, 3 e 4.

A densidade média a granel do carvão vegetal foi igual a 181 kg/m<sup>3</sup> e a densidade aparente média foi igual a 312 kg/m<sup>3</sup>. De acordo com Santos (2008) para uso siderúrgico, a densidade a granel deve apresentar valores superiores a 200 kg/m<sup>3</sup> e para a densidade aparente valores acima de 400 kg/m<sup>3</sup>. Os valores inferiores de densidade do carvão obtidos neste experimento podem ser explicados pela baixa densidade da madeira utilizada (420kg/m<sup>3</sup>), pois, segundo Santos (2010), durante a carbonização da madeira, devido à degradação térmica de seus principais componentes, perde-se em média 65% de massa. Logo, quanto maior for a densidade da madeira, haverá mais massa de madeira e, conseqüentemente, maior será a massa restante presente no carvão vegetal.

Vale ressaltar que carvão vegetal com densidade mais elevada acarreta em menor volume ocupado do alto-forno com carvão, elevando a produtividade da produção de ferro-gusa (BRITO, 2010).

A umidade de equilíbrio higroscópico do carvão variou de 4,17 a 6,78%, com média de 4,60% para as carbonizações 2, 3 e 4. Os valores verificados estão em conformidade com as especificações do setor siderúrgico que utiliza o carvão vegetal como termorreduzidor, que segundo Santos (2008), aceita variação de 1 a 6%, sendo 4% o valor ideal.

O poder calorífico superior (PCS) variou de 8.089 kcal/kg para a terceira carbonização a 8.131 kcal/kg verificado no carvão produzido na segunda carbonização. Esse parâmetro foi o que apresentou menor coeficiente de variação, 0,63%. Pereira (2011), ao carbonizar a madeira de *Eucalyptus urophylla* aos 7 anos, em forno mufla, obteve o valor médio de 8243 kcal/kg para o carvão vegetal, enquanto Cardoso (2010)

obteve como valor médio de 7.929 kcal/kg para o carvão vegetal produzido no forno MF1-UFV. Portanto, o PCS do carvão vegetal produzido nesse sistema forno-fornalha ficou próximo ao normalmente encontrado na literatura e desejado para uso siderúrgico e doméstico.

Frederico (2009) afirma que maiores poderes caloríficos refletem em menor consumo do redutor para uma mesma produtividade, o que reduz significativamente o consumo do insumo na atividade siderúrgica. O elevado poder calorífico do carvão vegetal obtido nas carbonizações no sistema forno-fornalha pode ser explicado pelo teor de carbono fixo superior a 80%. Este fato ocorreu porque as carbonizações alcançaram temperaturas máximas  $v$  entre 450 e 480°C. De acordo com Oliveira *et al.* (2010), a temperatura final tem significativa influência na qualidade do carvão vegetal e que carbonizações com temperatura final próximo a 450°C tendem a apresentar maior rendimento em carvão vegetal e elevado poder calorífico e teor de carbono fixo em sua constituição.

O porcentual de cinzas do carvão foi igual a 1,00%, valor normalmente verificado para carvão produzido com madeira de eucalipto com casca. O teor de materiais voláteis foi de 17,07%, enquanto o carbono fixo foi igual a 81,93%. Segundo Santos (2008), a faixa desejada de carbono fixo no carvão para uso siderúrgico está compreendida entre 75 e 80%.

Assis (2007), avaliando as propriedades químicas do carvão vegetal produzido em um sistema para carbonização que consistia de uma unidade de carvoejamento metálica, uma unidade isolante em alvenaria e uma câmara de combustão externa, encontrou valor médio de 0,18% para o teor de cinzas, 73,98% para carbono fixo e teor de materiais voláteis igual a 25,75%. Arruda *et al.* (2011) avaliaram o carvão vegetal produzido em fornos retangulares e encontraram 0,57% de cinzas, 22,73% de materiais voláteis e 76,70% de carbono fixo. Os teores de cinzas e carbono fixo encontrado por esses autores foram inferiores ao verificado para o carvão vegetal produzido neste sistema forno-fornalha, enquanto o teor de materiais voláteis foram superiores.

O índice de friabilidade média dos carvões oriundos das carbonizações 1 e 2 foi igual a 16,27 e 18,95%, respectivamente. Portanto, são classificados como friabilidade média segundo a classificação do CETEC, citado por Oliveira *et al.* (1982). Cardoso (2010), ao determinar a friabilidade do carvão vegetal produzido no forno MF1-UFV com queima de gases na fornalha, obteve índice de 16,41%, sendo o carvão considerado mediamente friável.

Nas carbonizações 3 e 4 os carvões tiveram índice de friabilidade de 13,12e 13,78%, respectivamente, sendo classificados como pouco friáveis, ou seja, o carvão produzido nessas carbonizações apresenta menor suscetibilidade de geração de finos durante seu manuseio, principalmente durante o transporte da unidade produtora para as siderúrgicas. Assis (2007) obteve resultados semelhantes ao determinar a friabilidade do carvão vegetal produzido em um sistema de carbonização da madeira consistindo numa unidade de carvoejamento metálica, uma unidade isolante em alvenaria e uma câmara de combustão externa.

## 6 CONCLUSÕES

A estrutura e os materiais utilizados na construção do sistema forno-fornalha foram adequados para produção de carvão vegetal, uma vez que suportaram as carbonizações sem a necessidade de reparos, além de terem apresentado baixo custo e facilidade de construção.

O medidor infravermelho de temperatura foi uma ferramenta adequada para o controle da carbonização, devido a inexistência da emissão de gases pela chaminé, meio este normalmente utilizado pelos produtores de carvão para o controle da carbonização. Além de ser uma forma de controle que não utiliza fatores subjetivos para a determinação da temperatura do forno e controle da carbonização.

O controle da carbonização, assim como a medição da temperatura, pode ser realizado em intervalos de 4 horas, necessitando de maior acompanhamento somente no momento de mudança da fase de carbonização, evitando elevações da temperatura acima do estabelecido.

A determinação de faixas de carbonização em função do tempo e da temperatura permite ao carbonizador reconhecer as fases do processo, auxiliando-o na tomada de decisão sobre as ações que deverão ser executadas no forno.

A determinação do perfil térmico de cada carbonização permite o reconhecimento de falhas durante o controle da carbonização e do resfriamento, sendo utilizado como ferramenta para correção nas carbonizações posteriores, além de apresentar a evolução da temperatura no interior do forno ao longo do tempo, podendo explicar possíveis resultados encontrados.

O sistema forno-fornalha apresentou produção satisfatória de carvão vegetal com elevados índices de qualidade para os diversos usos ao qual se destina.

A fornalha funcionou adequadamente, realizando a combustão dos gases gerados na carbonização durante um terço do tempo total de carbonização, sem a necessidade de abastecimento com resíduos lignocelulósicos, além de reduzir quase que a totalidade das emissões de gases para o ambiente.

A queima de resíduos para manter o funcionamento da fornalha, principalmente durante a fase endotérmica da carbonização, não será necessária quando o sistema estiver funcionando em sincronização com maior número de fornos.

## **7 RECOMENDAÇÕES**

Recomendam-se novos estudos para o redimensionamento da fornalha com o objetivo de favorecer a manutenção da temperatura em seu interior, maximizar a queima de gases combustos da carbonização na fornalha e o aproveitamento da energia térmica gerada para a secagem da madeira ou fornecimento de energia elétrica.

Recomendam-se também estudos para determinação do número mínimo e posicionamento ideal dos cilindros metálicos para mensuração da temperatura interna do forno com o uso de um medidor infravermelho, no intuito de diminuir os custos de construção do forno e facilitar o manejo do carbonizador, quando este estiver realizando o controle da carbonização em um número maior de fornos.

## 8 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philladelphia: 1982.

ARRUDA, T. P. M. **Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares**. 2005. 44p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. 2005.

ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. 2011. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.4, p.949-955, 2011.

ASSIS, C. O. **Sistema alternativo para carbonização da madeira**. 2007. 49p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7170**:Tijolos maciço cerâmico para alvenaria - especificação. Rio de Janeiro, 1983. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8041**:Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – forma e dimensões - padronização. Rio de Janeiro, 1983. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 9165**: Carvão vegetal: Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. 2011. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2010**. Brasília, 2011. 130p.

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

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.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 317**, de 12 de maio de 2011. Veda a utilização de carvão vegetal produzido com matéria-prima oriunda de extrativismo, altera a Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, Código Florestal, e a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências.

BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 9, p1-19, 1990.

BRITO, J. O. **Desafios e perspectivas da produção e comercialização do carvão vegetal**. 2010. II Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal. Sete Lagoas – MG. 2010.

BYRNE, C. E.; NAGLE, D. C. Carbonization of wood for advanced materials applications. 1997. **Carbon**, Elmsford, v. 35, n. 2, p. 259-266, 1997.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR**. 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG. 2008.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira**. 2010. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2010.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. 2010. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; SANTOS, R. C. **Treinamento carvão vegetal: apostila teórica e prática**. Viçosa-MG, 2011. 129p.

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

CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS-CIFLORESTAS. 2011. **Preço de produtos - Carvão vegetal**. Viçosa, MG. Disponível em: <[http://www.ciflorestas.com.br/dado.php?id=16&n=preco\\_de\\_produtos\\_carvao\\_-\\_plantadas\\_belo\\_horizonte\\_mg](http://www.ciflorestas.com.br/dado.php?id=16&n=preco_de_produtos_carvao_-_plantadas_belo_horizonte_mg)>. Acesso em: 30 nov. 2011.

ELYOUNSSI, K.; BLIN, J. L.; HALIM, M. High-yield charcoal production by two-step pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 2010. New York, v. 87, n. 1, p. 138-143, Jan. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. 2011. **Balanco Energético Nacional 2011: Ano Base 2010**. Rio de Janeiro, 2011. 266p. Disponível em: <<http://www.ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 25 out. 2011.

FÁVERO, G. C.; VALLE, R. M.; DUARTE, T. M. Análise térmica de um sistema de combustão de alcatrão em fornos retangulares para secagem da madeira. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco. **Anais...**, Peru: PUCP, 2007, 343-347.

FREDERICO, P. G. U. **Influência da densidade e composição química da madeira sobre a qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* S.T.Blake.** 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

GAO, M.; SUN, C.; ZHU, K. Thermal degradation of wood treated with guanidine compounds in air. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Oxford, v. 75, n. 1, p. 221-232, Jan. 2004.

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

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

GONZÁLEZ, J. F.; ENCINAR, J. M.; CANITO, J. L.; SABIO, E.; CHACÓN, M. Pyrolysis of cherry stones: energy uses of the different fractions and kinetic study. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 67, p. 165-190, 2003.

JURIZATO, L. A.; PEREIRA, P. S. R. Sistemas Supervisórios. **Network Technologies**, Nova Odessa, vol.1/2, n.1/2, p.105-114, 2003.

LOPES, R. P., OLIVEIRA FILHO, D., DONZELES, S. M. L. Ferreira, W. P. M. Controle da combustão em fornalhas a lenha.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000002200000200023&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000002200000200023&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 19 de Jan. 2012.

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.

MARRI, A.; OLIVEIRA, J. B.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. **Manual de construção e operação de fornos de carbonização.** 1982. Belo Horizonte. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. 55p. 1982.

MATARELLI, F. A.; LOPES, L. E. F.; CASTRO, L. F. A. Siderurgia a carvão vegetal. In: \_\_\_\_\_. **Biomassa: energia nos trópicos em Minas Gerais.** Belo Horizonte: FAFICH, 2001. p. 145-161.

MCKENDRY, P. Conversion technologies. 2002. **Bioresource Technology**, Essex, v. 83, n. 1, p. 47-54, 2002.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: **Produção e utilização do carvão vegetal.** 1982. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. p. 75-89. 1982.

MILOSAVLJEVIC, I.; OJA, V.; SUUBERG, E. M. Thermal effects in cellulose pyrolysis: relationship to char formation processes. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 35, n. 3, p. 653-662, Mar. 1996.

MINAS GERAIS. **Lei nº18.365**, de 01 de setembro de 2009. Altera a Lei nº 14.309, de 19 de junho de 2002, que dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade no Estado, e o art. 7º da Lei Delegada nº 125, de 25 de janeiro de 2007, que dispõe sobre a estrutura orgânica básica da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD, e dá outras providências.

MINETTE, L. J.; PIMENTA, A. S.; FARIA, M. M.; SOUZA, A. P.; SILVIA, E. P.; FIEDLER, N. C. Avaliação da carga de trabalho físico e análise biomecânica de trabalhadores da carbonização em fornos tipo “rabo-quente”. 2007. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.5, p.853-858, 2007.

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 nov. 2011.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. 2010. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

OLIVEIRA, J. B.de.;VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P. A. Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos. In: **Produção e utilização de carvão vegetal**. 1982. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. p.60-73. 1982.

OLIVEIRA, J. B. de; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Carbonização da madeira, modelo físico e influência das variáveis de processo. **Boletim da Associação Brasileira de Metais**, São Paulo, v. 40, n. 319, p. 315-319, jun. 1984.

OLIVEIRA, R. L. M. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal**. 2009. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. 2009.

PALUDZYSYN FILHO, E. Melhoramento do eucalipto para a produção de energia. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, jun-ago 2008. Disponível em: <[http://www.revistaopinioes.com.br/cp/edicao\\_materias.php?id=15](http://www.revistaopinioes.com.br/cp/edicao_materias.php?id=15)> Acesso em: 31 nov 2011.

PEREIRA, B. C. S. **Propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus sp.* em função da idade de corte**. 2011. Monografia (Engenharia Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.

RAAD, T. J. Instrumentação e Controle de Processo de Carbonização dos Fornos Industriais da V&M Florestal. **Anais...1º Congresso Internacional de uso da biomassa plantada para a produção de metais e geração de eletricidade**, Belo Horizonte, Brasil, 8-11 outubro, 2001.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus spp.*** 2004. 115p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG. 2004.

REZENDE, J. B. e SANTOS, A. C. **A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades.** 2010. Viçosa, MG: U.R. EPAMIG ZM, 2010. 80p.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental.** 2006. Belo Horizonte - MG. 2006.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia.** 2011. 84p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. 2011.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J.S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.** Editora Taylor & Francis Group. New York. 487 p. 2005.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SANTOS, R. C. dos. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto.** 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2010.

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.

SOARES, V. C. **Comportamento químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades.** 2011. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2011.

SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry - Fundamentals and Applications.** 1993. Editora Academic Press, 293 p. 2 ed. 1993.

TACCINI, M. M. **Estudo das metodologias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, referentes à avaliação de emissões de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal.** 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2011.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp.** In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 264 om-88: preparation of wood for chemical analysis**. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 257 cm-85: sampling and preparing wood for analysis**. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 114-201, jul./dez. 2001.

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.

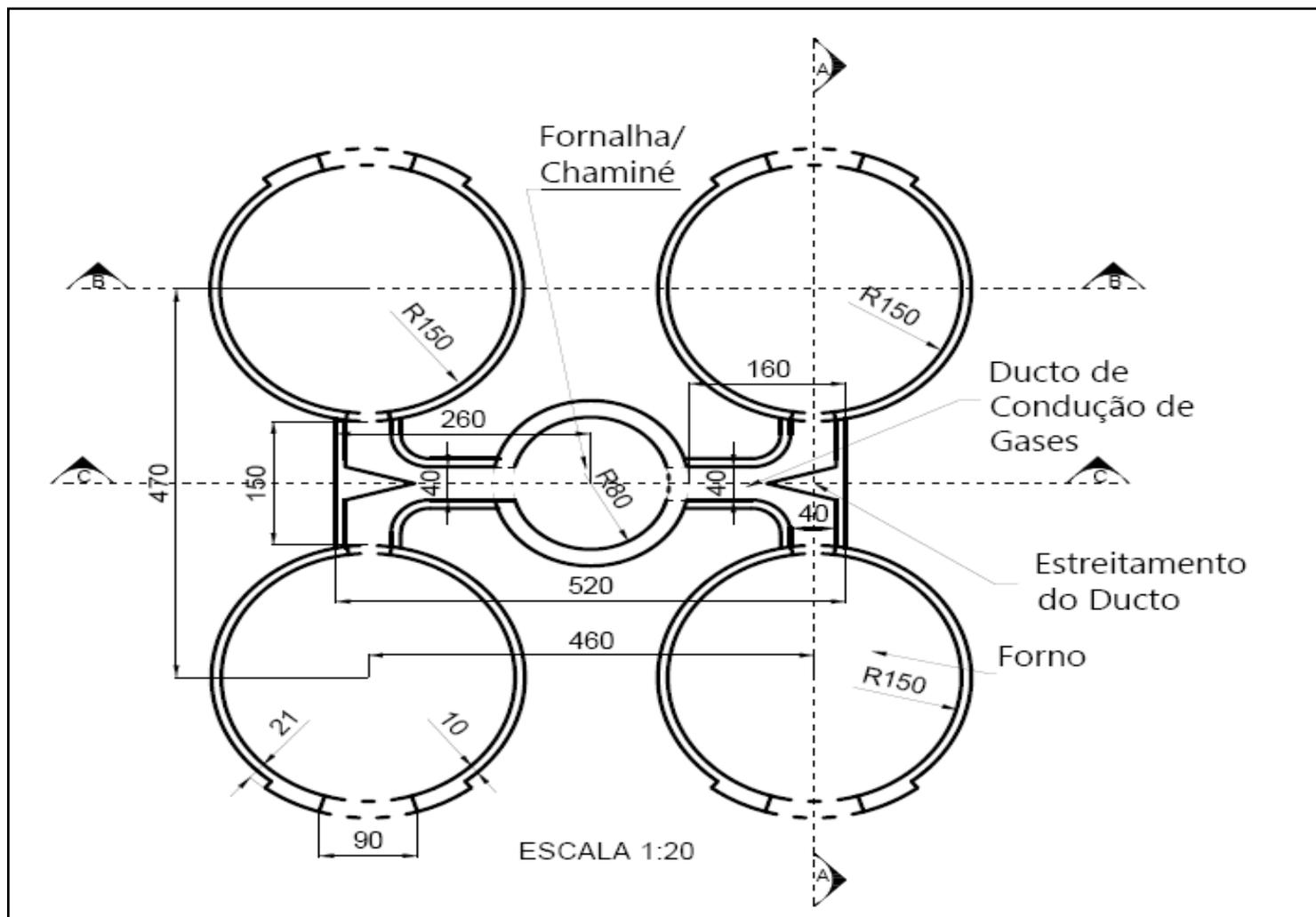
VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H. ; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. 2007. **Fuel**, v. 86, p. 1781-1788, 2007.

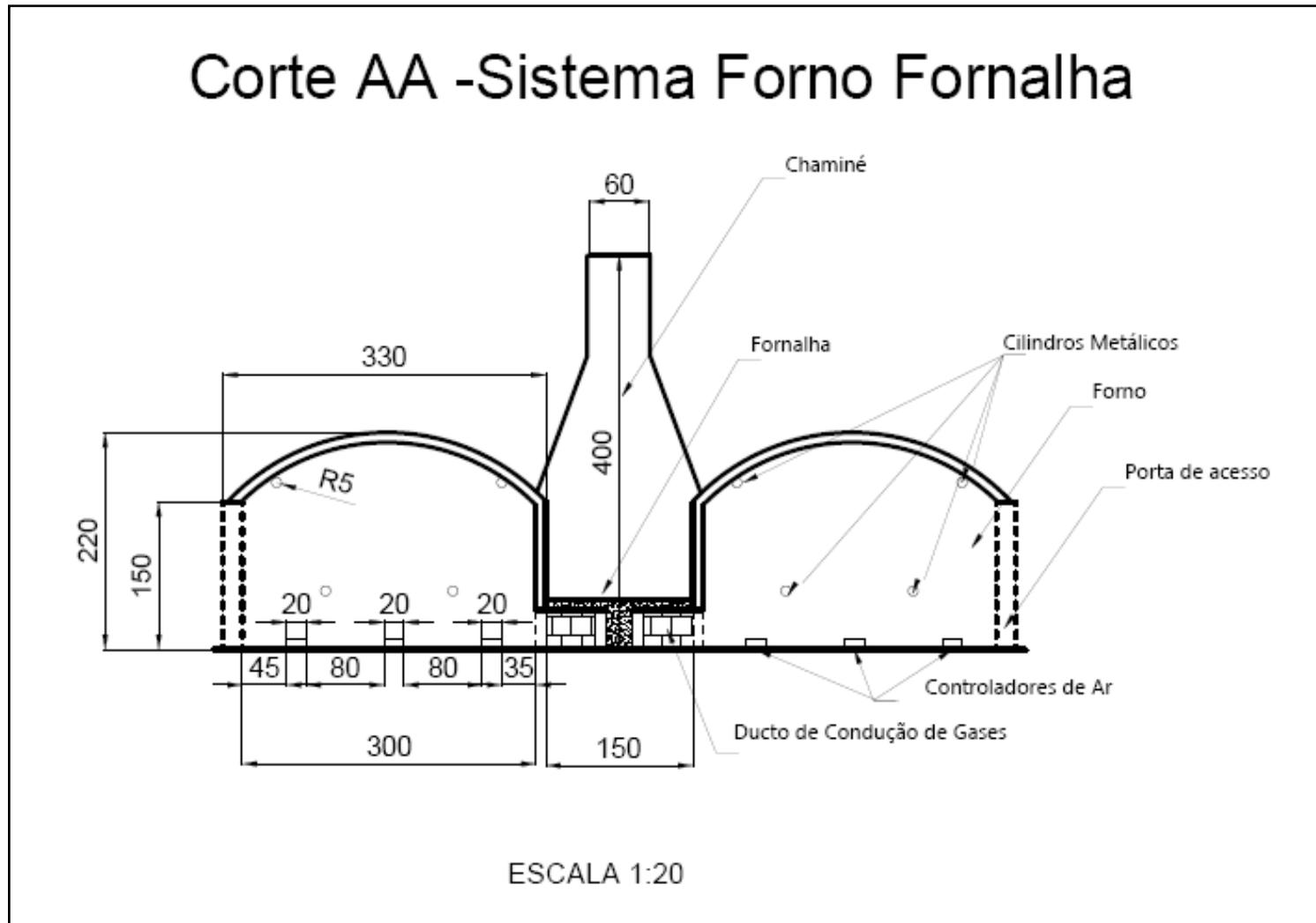
**ANEXOS**

**Tabela 1A** – Materiais e custos de construção do sistema forno-fornalha, com 3 fornos.

<b>Material</b>	<b>Especificação</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Total</b>
Tijolos-Forno	Tijolo maciço cerâmico * Frete FOB	10185	0,16	1.629,60
Tijolos-Fornalha	Tijolo maciço cerâmico * Frete FOB	1000	0,16	160,00
Tijolos-Chaminé	Tijolo maciço cerâmico * Frete FOB	1380	0,16	220,80
Tijolos-Conexões	Tijolo maciço cerâmico * Frete FOB	525	0,16	84,00
Argamassa de Solo argiloso e Água	Ponto de liga	Indeterminado	-	0
Manta Cerâmica (m)	Nutecibar	5,1	32,00	163,20
Gabaritos de Madeira	Confecção da porta e diâmetro circular do forno	2	-	0
Cinta Metálica para os Fornos	3/8, comprimento: 9,95 m	3	17,95	53,85
Roscas e porcas	-	3	2,80	8,40
Cinta Metálica para a Fornalha	3/8, comprimento: 2,55 m	1	4,50	4,50
Roscas e porcas	-	1	2,80	2,80
Barra de ferro rosqueada	3/8, utilizada para travar cinta, comprimento: 0,3m	4	4,00	16,00
Cantoneira	Tipo U, comprimento: 1,00 m	3	10,00	30,00
Chapas metálicas das conexões	Chapa de ferro preto 3/16 (guilhotina)	3	60,00	180,00
Mão-de-obra (dias)	1 pedreiro e 1 ajudante	4	150,00	600,00
Medidor infravermelho de temperatura	Medição de temperatura do forno	1	210,00	210,00
Poços Metálicos	Medição de temperatura no forno, 8 por forno	24	10,00	240,00
<b>Total</b>				<b>R\$ 3.603,15</b>



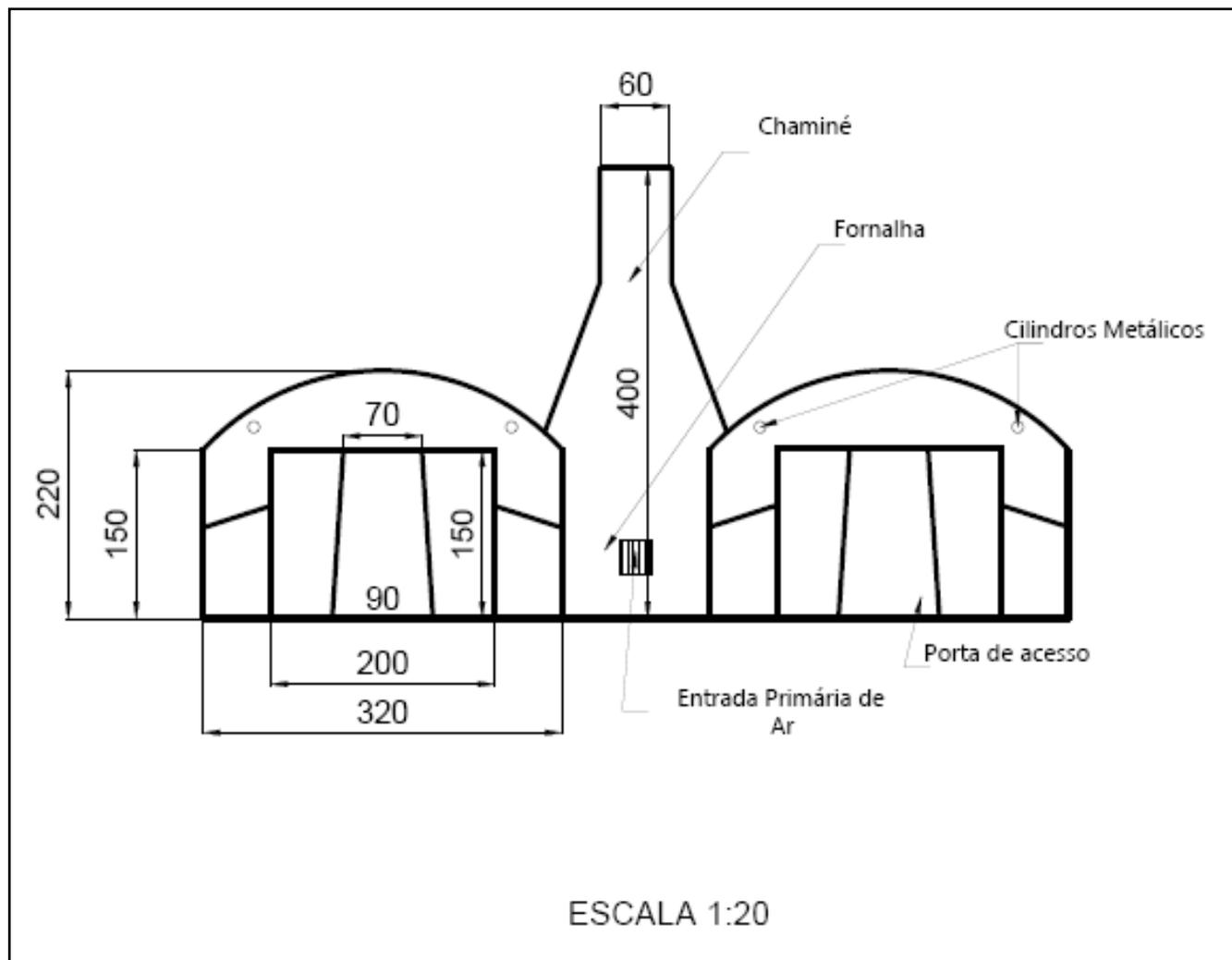
**Figura 1A** – Planta baixa do sistema forno-fornalha, com medidas em centímetros.



**Figura 2A** – Corte AA do sistema forno-fornalha, com medidas em centímetros.

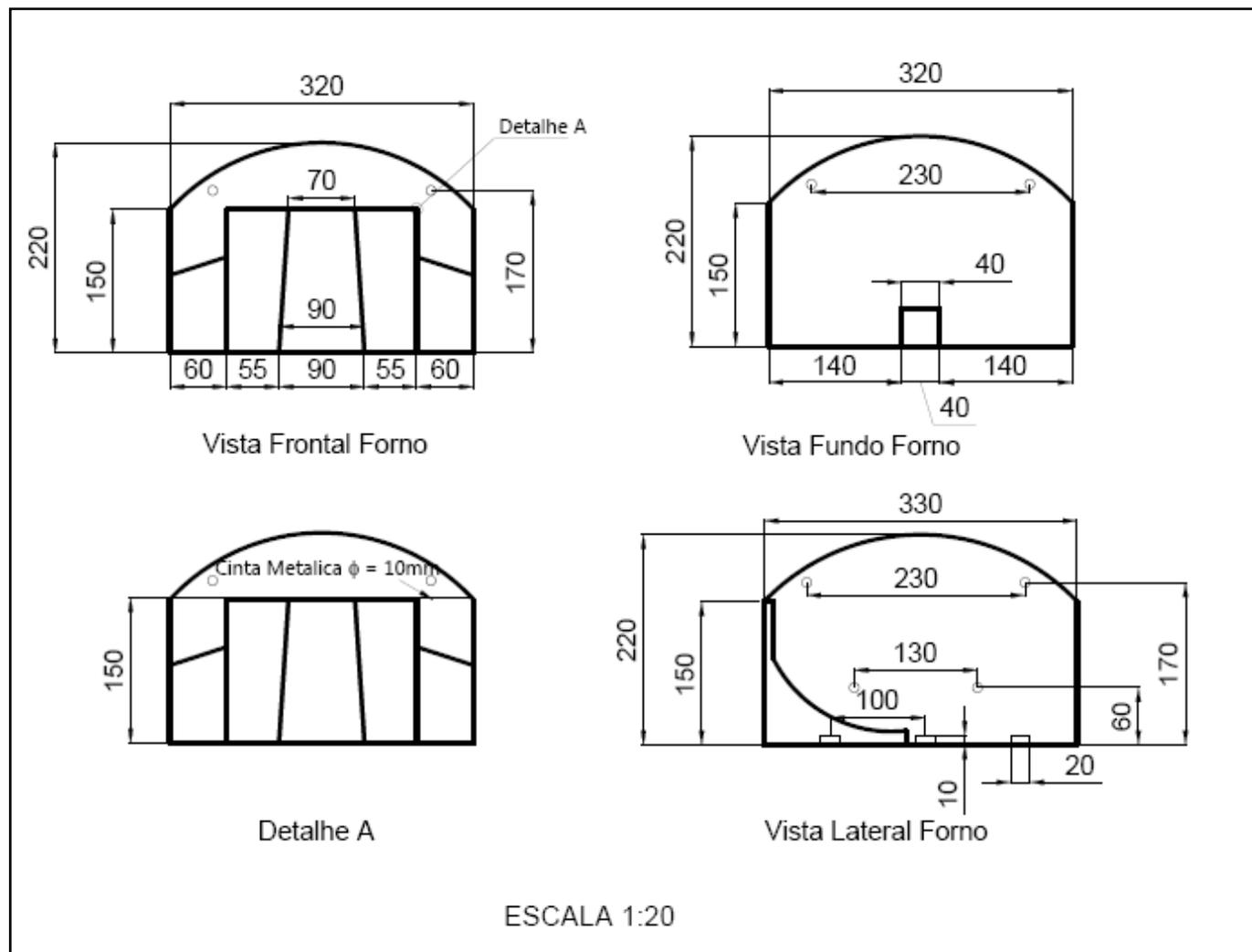






**Figura 5A** – Vista frontal do sistema forno-fornalha, com medidas em centímetros.





**Figura 7A** – Vistas do forno; detalhe A representando o local da instalação da cinta metálica no forno, com medidas em centímetros.