

EFEITO DA COMBUSTÃO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO NO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DA MADEIRA DE *Eucalyptus* sp.

Marco Túlio Cardoso¹, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro², Renato Augusto Pereira Damásio³, Laércio Antônio Gonçalves Jacovine⁴, Benedito Rocha Vital⁵,
Maria Cristina Martins⁶, Rosimeire Cavalcante dos Santos⁷

Resumo: O objetivo do trabalho foi determinar o efeito da combustão dos gases da carbonização para redução das emissões no rendimento gravimétrico em carvão vegetal, madeira parcialmente carbonizada e finos. Para realização das carbonizações foi utilizado um sistema forno-fornalha, com capacidade para 10 estéreos de madeira. A madeira utilizada foi de *Eucalyptus* sp., com 8 anos de idade. De acordo com os resultados obtidos, a combustão dos gases não influenciou o rendimento em carvão vegetal, porém reduziu a proporção de madeira parcialmente carbonizada e aumentou a quantidade de finos.

Palavras-chave: queima de gases; redução da emissão de poluentes, redução de poluentes da carbonização.

EFFECT OF GASES CARBONIZATION COMBUSTION IN THE GRAVIMETRIC YIELD OF *Eucalyptus* sp. WOOD.

Abstract: The work objective was to determine the effect of gases combustion of the carbonization, for reduction of the emissions, in the vegetable coal gravimetric yield, wood partially charred and fine. A system of over-furnace was used for doing the carbonization. It had 10 wood stereos capacity. The wood used for the study was *Eucalyptus* sp., 8 year-aged. According to the obtained results, the gases combustion did not influence the gain in

¹ Engenheiro Florestal, Ms; Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000, Viçosa-MG, <mtulio_cardoso@yahoo.com.br>

² Professora Adjunta da UFV; Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000, Viçosa-MG, <cassinha-carneiro@yahoo.com.br>.

³ Graduando em Engenharia Florestal - UFV; Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000, Viçosa-MG, <renatodamasio@gmail.com>

⁴ Professor Adjunto da UFV; Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000, Viçosa-MG, <jacovine@ufv.br>.

⁵ Professor Titular da UFV; Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000, Viçosa-MG, <bvital@ufv.br>

⁶ Mestre em Ciências Florestais - Universidade Federal de Viçosa, Rua Capitão José Maria, 250, Centro, Viçosa-MG, <leteminas@hotmail.com>

⁷ Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, CEP 36570-000, <meire_caico@yahoo.com.br>

vegetable coal, however it reduced the wood proportion partially charred and it increased the amount of fine.

Keywords: burns of gases; reduction of the emission of pollutant, reduction of pollutant of the carbonization.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é responsável por 40% da produção mundial de carvão vegetal, utilizado principalmente, na produção de ferro gusa, assim como na de aço, de ferro ligas e de silício metálico. Em 2008, o país consumiu cerca de 34 milhões de m³ de carvão vegetal. Ressalta-se que o Estado de Minas Gerais detém o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo e tem se destacado como o maior produtor e consumidor desse insumo energético, atingindo, em 2007, a marca de 21,908 milhões de mdc, o que corresponde a 59,67% do total produzido (Associação Mineira de Silvicultura - AMS, 2009). O setor de base florestal participa com 7% do PIB mineiro (ASSIS, 2003), e em decorrência da importância desse setor para o Estado, criou-se, em 2007, o Pólo de Excelência em Florestas, com sede na Universidade Federal de Viçosa, como um instrumento de apoio ao desenvolvimento desse importante segmento.

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

A transformação da madeira em carvão vegetal é um processo de decomposição térmica físico-química irreversível, que se inicia com a secagem, com a perda de água livre ou capilar e de água de adesão. Após a retirada da água, inicia-se a fase de pirólise, com a produção de gases condensáveis e não condensáveis (VALE e GENTIL, 2008).

Segundo Carvalho Jr. e Mcquay (2007), a combustão ideal, designada como combustão completa, ocorre quando todo carbono no combustível é oxidado para dióxido de carbono (CO₂), todo hidrogênio para água (H₂O) e todo enxofre para dióxido de enxofre (SO₂). Assim, para combustão eficiente dos gases da carbonização, esses devem ser convertidos em dióxido de carbono, vapor d'água e energia.

Além da questão ambiental, é importante destacar que para tornar viáveis tecnologias de redução de emissão de gases da carbonização da madeira, essas não devem

prejudicar a produção e a qualidade do produto final, além de serem de baixo custo aquisitivo.

Sendo assim, o objetivo do trabalho foi avaliar a influência da combustão dos gases da carbonização de madeira no rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em madeira parcialmente carbonizada (“tiços”) e em finos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

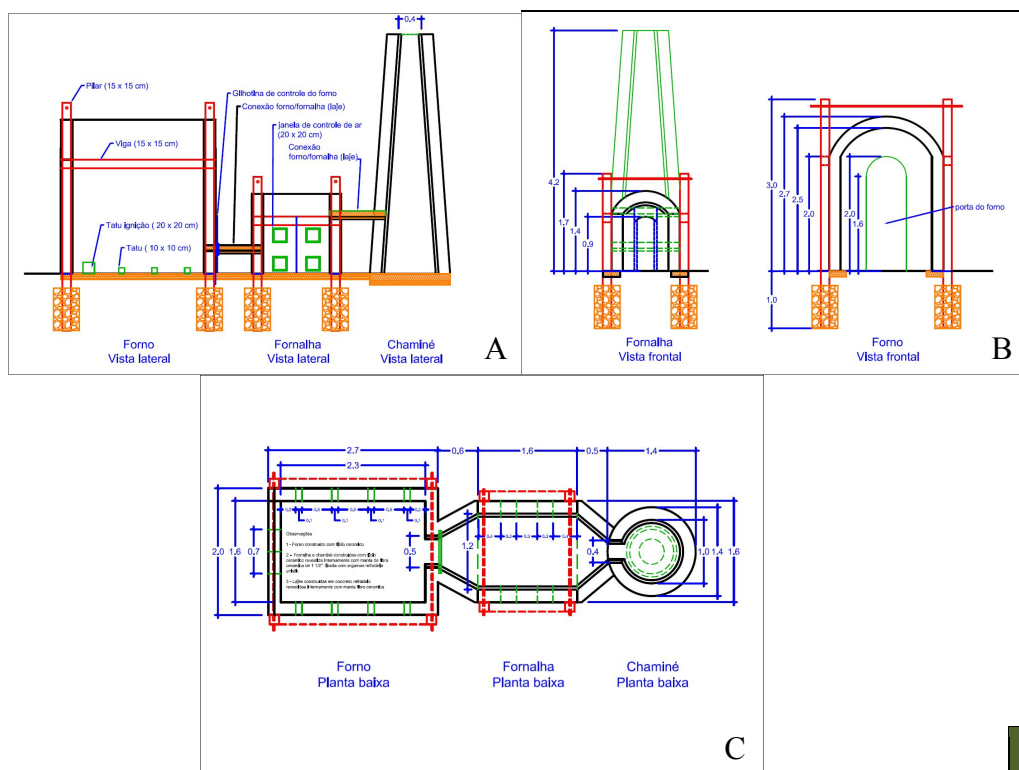
2.1. Obtenção da matéria-prima

Nas carbonizações utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., com idade de 8 anos, com comprimento de 2,10 m e diâmetro variando de 12 a 20 cm, provenientes de plantios da empresa Plantar, situados no município de Felixlândia, MG.

2.2. Características do sistema de forno-fornalha

O sistema forno-fornalha, que tem capacidade para 10 estéreos de madeira, foi construído a partir de um projeto fornecido pela empresa ArcelorMittal Bioenergia, situada em Martinho Campos/MG.

Esse sistema foi desenvolvido tendo em vista seu uso pelo pequeno produtor de carvão. Para tal, foram utilizados tijolos maciços na confecção das paredes com 20 cm de espessura. Para a confecção dos pilares foram utilizados concreto e ferragens.



Nota: Medidas das figuras em metro.

Figura 1. (A) Vista lateral do forno com fornalha; (B) Vista frontal do forno e da fornalha; (C) Planta baixa do sistema forno-fornalha.

Figure 1. (A) Lateral seen of the oven-furnace; (B) Frontal seen of the oven-furnace; (C) low Plant of the system oven-furnace.



Figura 2. Sistema forno-fornalha.

Figure 2. Oven-furnace system

2.3. Análise da madeira

A densidade básica da madeira foi determinada segundo método descrito por Vital (1984). Já para a determinação de composição química da madeira, as amostras de madeira foram transformadas em serragem utilizando-se para isso um moinho de laboratório tipo Wiley, de acordo com a norma 257 om-52. Foi utilizada a fração que atravessou a peneira nº 16 internacional (malha 40 ASTM) e fica retida na peneira nº 24 internacional (malha 60 ASTM). A determinação do teor absolutamente seco foi realizada conforme a norma TAPPI 264 0m-88.

Os teores de extrativos na madeira foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 264 om-88, apenas alterando o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno, uma vez que o primeiro é perigoso aos seres humanos.

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

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

Determinou-se o poder calorífico superior segundo a norma NBR 8633.

2.4. Rendimento gravimétrico

Foram realizadas duas carbonizações com combustão dos gases e duas sem combustão, todas monitoradas por pirometria.

A determinação do rendimento em carvão dos tipos finos e ticos foi realizada por meio da análise gravimétrica. Para isso, antes de ir ao forno para carbonização, a madeira foi pesada e dela retiradas amostras para determinação do teor de umidade. Após a carbonização, obtiveram-se as massas do carvão, dos finos e dos tiços gerados. Esses valores foram utilizados para os cálculos do rendimento gravimétrico de carvão, finos e tiços (Equações 1, 2 e 3 respectivamente).

$$RGC = 100 \times \frac{mc}{mms} \quad (\text{Equação 1})$$

$$RGF = 100 \times \frac{mf}{mms} \quad (\text{Equação 2})$$

$$RGt = 100 \times \frac{mt}{mms} \quad (\text{Equação 3})$$

em que: RGC= Rendimento gravimétrico em carvão (%); mc= massa de carvão (kg); RGF= Rendimento gravimétrico em finos (%); mf= massa de finos (kg); RGt= Rendimento gravimétrico em tiço (%); mt= massa de tiço (kg); mms= massa de madeira seca (kg).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades da madeira de *Eucalyptus* sp.

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades da madeira.

Tabela 1. Propriedades da madeira de *Eucalyptus* sp.

Table 1. *Eucalyptus* sp. wood properties.

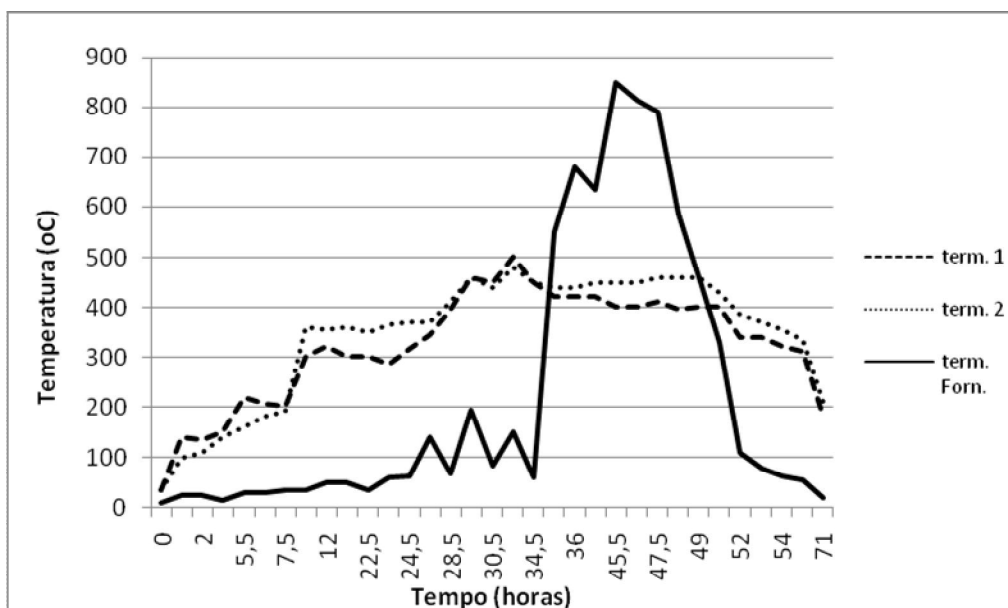
Material	Teor de umidade (%)	Densidade básica (g/cm ³)	Poder calorífico superior (kcal/kg)	Composição química (%)		
				Extrativos	Lignina total	Holocelulose
<i>Eucalyptus</i> sp.	24,09	0,57	4726,17	4,40	28,67	66,92

Nota-se que para sua carbonização, a madeira deve conter teores de umidade abaixo de 30%, portanto, para este parâmetro, a madeira está nas condições adequadas. Na composição química da madeira, a proporção de lignina é muito importante para a produção de carvão vegetal. Por ter uma estrutura mais condensada, ela é responsável por dar origem a maior parte do carbono presente no carvão vegetal, enquanto que outros componentes são degradados com mais facilidade no processo de carbonização.

Observa-se que o valor obtido neste trabalho para a densidade básica foi acima dos obtidos por Alencar et al. (2002) que observou valor médio de 0,521 g/cm³ para densidade da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*, com 7 anos de idade. Em relação aos valores de composição química, o autor encontrou 69,9% de holocelulose, 27,38% de lignina e 2,72% de extrativos.

3.2. Carbonizações com madeira de *Eucalyptus* sp.

Na Figura 3, é apresentado o perfil térmico médio das carbonizações com combustão dos gases.



Onde: Term. 1 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à porta; Term. 2 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à saída dos gases; Term. Forn. : termopar colocado na saída de gases do forno para fornalha.

Figura 3. Variação da temperatura em função do tempo das carbonizações com queima dos gases pela fornalha.

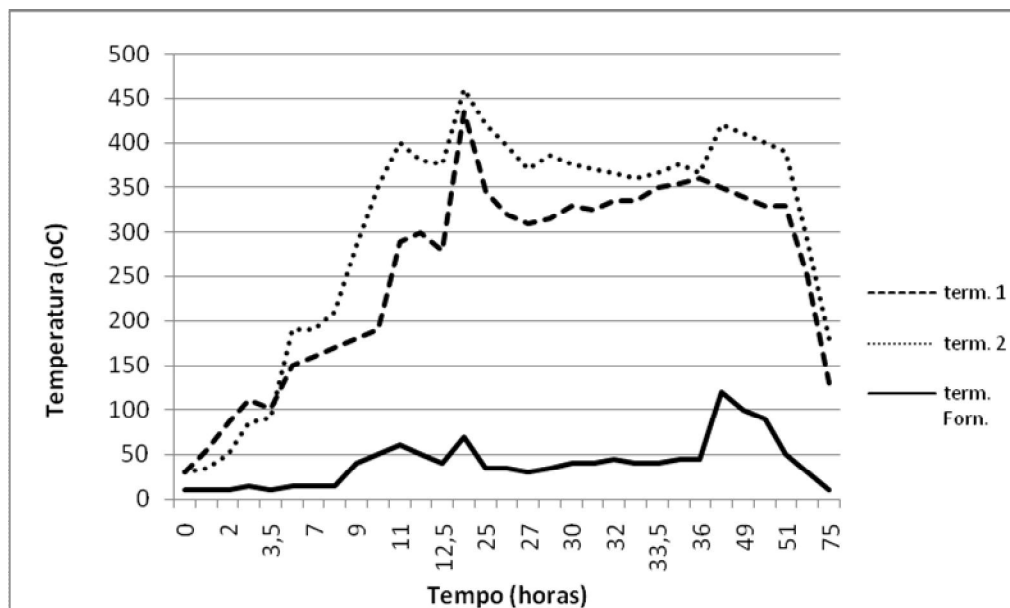
Figure 3. The temperature variation in function of the time of the carbonizations with the burning of the gases for the furnace.

A temperatura máxima de carbonização (500°C) ocorreu após 31 horas da ignição. O fechamento total do forno ocorreu após 52 horas de carbonização, quando a fornalha cessou a queima dos gases da carbonização, e o fluxo e temperatura deles diminuíram, indicando o fim do processo.

Para a queima dos gases, foi dada ignição na fornalha com resíduos lignocelulósicos, no mesmo instante da ignição do forno, mantendo-a acesa até o momento em que a chama permanecesse constante, sem a necessidade de adicionar mais resíduos. No período entre 24 horas e 34 horas de carbonização, os gases começaram a ser queimados na fornalha, porém com algumas interrupções, sendo necessário reacendê-la. No entanto, a partir da 35° hora de carbonização, os gases foram queimados com eficiência, por cerca de 17 horas ininterruptas, atingindo a temperatura máxima de 850°C , ou seja, a fornalha funcionou por aproximadamente 33% do tempo de carbonização.

Na Figura 4, observa-se o perfil térmico médio das carbonizações sem combustão dos gases. A temperatura máxima de carbonização foi de 460°C , atingida após 24 horas da ignição. O fechamento do forno ocorreu após aproximadamente 52 horas de carbonização,

quando a fumaça na chaminé cessou e a temperatura dentro do forno começou a cair naturalmente.



Onde: Term. 1 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à porta; Term. 2 : termopar colocado na parte superior do forno, próximo à saída dos gases; Term. Forn. : termopar colocado na saída de gases do forno para fôrnalha.

Figura 4. Variação da temperatura em função do tempo da primeira carbonização da madeira de eucalipto, sem queima dos gases pela fôrnalha.

Figure 4. The temperature variation in function of the time of the first carbonization of the eucalyptus wood, with no gases burning for the furnace of the gases for the furnace.

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

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

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

3.3. Rendimento gravimétrico das carbonizações

Na Tabela 2 e na Figura 5, verificam-se os valores médios de rendimento gravimétrico das carbonizações com madeira de eucalipto, em massa e percentagem, respectivamente.

Tabela 2. Rendimento gravimétrico, em massa, das carbonizações com madeira de eucalipto.

Table 2. Gravimetric yield, in mass, of the carbonizations with eucalyptus wood.

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

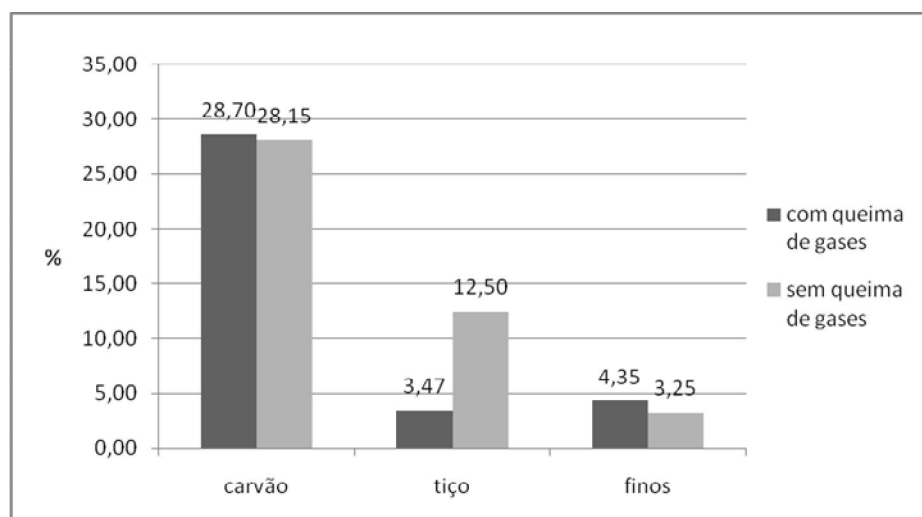


Figura 5. Rendimento gravimétrico, em porcentagem, das carbonizações com madeira de eucalipto.

Figure 5. The carbonization gravimetric yield with eucalyptus wood in percentage.

Era esperado um rendimento gravimétrico em carvão vegetal médio de pelo menos 30%. Sendo assim os valores obtidos foram considerados baixos, evidenciando a necessidade de maiores ajustes no controle do processo de carbonização.

A formação de “tiço” foi superior para carbonização sem queima de gases, 12,5%, contra 3,5% observados na carbonização com queima de gases. Esses valores estão relacionados com a geração de finos, pois se obteve maior percentagem de finos na carbonização com queima de gases, 4,35%, contra 3,25% da carbonização sem queima de gases. Isso ocorreu porque na carbonização com queima de gases há, desde o princípio do processo, o acendimento da fornalha, o que causa um gradiente de temperatura entre ela e o forno, fazendo com que a sucção dos gases seja maior, acelerando o processo de carbonização. Isso pode ser explicado pelo baixo valor de “tiços” obtido, e também, em contrapartida, pelo maior valor de geração de finos.

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

4 CONCLUSÕES

A fornalha funciona efetivamente como queimador de gases da carbonização, tendo mais de 30% do tempo total de carbonização com chama constante na câmara de combustão, reduzindo em quase totalidade os gases de efeito estufa;

A utilização da fornalha não influenciou o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e reduziu a quantidade de tiços, porém aumentou a proporção de finos gerados; evidenciando a necessidade de um maior controle da carbonização, visto que a queima dos gases aumenta a sua velocidade.

5 AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG por financiar o projeto.

À ArcelorMittal Bioenergia pelo projeto forno-fornalha.

À Plantar pela doação da madeira.

6 REFERÊNCIAS

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

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

ALENCAR, G. S. B.; BARRICHELO, L. E. G.; SILVA JÚNIOR, F. G. Qualidade da madeira de híbrido de *E. grandis* x *E. Urophylla* e seleção precoce. In: **35º Congresso e Exposição Annual de Celulose e Papel**, 2002, São Paulo. Disponível em ><http://www.celuloseonline.com.br/imagembank/Docs/DocBank/dc/dc054.pdf>< Acesso em 22 de fevereiro de 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **Normas técnicas NBR 8633. Determinação do Poder Calorífico**, Brasília, 1983. n. p.

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

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

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

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **Preparation of wood for chemical analysis** - Tappi T 204 cm-97. Atlanta: Tappi Press, 1997.

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

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. Preparation of wood goes chemical analysis, T264 om-88; Atlanta, 1994-1995.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. Sampling and preparing wood for analysis, T257 om-52; Atlanta, 1994-1995.

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 de densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21p. (Boletim técnico, 1).