

Recebido: 07-07-2014 Aceito: 23-02-2015

Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna

Renato Augusto Pereira Damásio¹, Aylson Costa Oliveira², Angélica de Cássica Oliveira Carneiro³, Daniel Camara Barcelos⁴, Barbára Luísa Corradi Pereira⁵, Mateus Alves de Magalhães, Carlos¹ Miguel Simões da Silva¹

¹Estudante de Pós-Graduação em Ciências Florestais - Departamento de Engenharia Florestal - UFV, Viçosa, MG.

²Professor Assistente da Universidade Federal do Mato Grosso, Estudante de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Florestal-UFV, Viçosa, MG.

³Professora do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, MG.

⁴Consultor - Engenheiro Florestal.

⁵Professora Assistente da Universidade Federal do Mato Grosso, Estudante de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Florestal-UFV, Viçosa, MG.

RESUMO Este trabalho objetivou verificar o efeito do controle da carbonização por meio da temperatura interna em forno circular no rendimento em carvão vegetal e nas propriedades do carvão produzido, bem como a elaboração do perfil térmico durante a carbonização e resfriamento do forno. O forno avaliado é classificado como circular de superfície, com capacidade de 12 st (9 m³) de madeira, foi construído em alvenaria e acoplado a uma fornalha para a combustão dos gases gerados no processo de produção de carvão vegetal. O controle da carbonização foi realizado com o uso da temperatura interna, mensurada por meio de sensor infravermelho de temperatura. A carbonização sem controle de temperatura teve rendimento em carvão de 26,4 %, enquanto que a média das carbonizações com controle da temperatura interna foi de 33,2 %. O carvão vegetal produzido no forno estudado possui qualidade satisfatória para uso industrial. Conclui-se que o controle da carbonização pela temperatura interna proporciona aumento no rendimento em carvão vegetal, além da redução do atijo gerado. A interpretação dos mapas térmicos, reconhecendo falhas durante a carbonização ou resfriamento, permitiu a melhoria no controle, resultando no aumento da produtividade e melhores índices de qualidade do carvão.

Palavras-chave: fornos de alvenaria, carvão vegetal, mapeamento térmico.

Thermal profile and control of carbonization on circular kiln through the internal temperature

ABSTRACT This study aimed to determine the effect of carbonization control through the internal temperature into charcoal yield and its properties as well as the development of a thermal profile during carbonization and cooling. The evaluated kiln is circular of surface, with a capacity of 12 st (9 m³) meters of wood; it was built in masonry and coupled to a furnace for combustion gases generated. The control of the carbonization is performed by measuring the temperature inside the kiln, with the aid of an infrared temperature sensor. Carbonization without temperature control showed 26.4% of charcoal yield, while the average of charcoal yield produced with temperature control was 33.2%. Charcoal produced on circular kiln offered suitable quality for domestic and industrial use. Carbonization control by the internal temperature provides a significant increase in charcoal yield, and reduced semi-carbonized wood. The interpretation of thermal maps and recognition of faults during carbonization or cooling, allow improvements in the control, which will result in increased productivity and quality of charcoal.

Keywords: kilns, charcoa, thermal mapping.

Introdução

A produção de carvão vegetal ocorre em ambientes fechados, em condições controladas de oxigênio, aplicando-se calor à madeira para sua destilação e para o desdobramento de seus constituintes diversos subprodutos. Dentre os produtos resultantes do processo de pirólise, citam-se os gases não condensáveis (dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, metano e hidrocarbonetos), os gases condensáveis (água e produtos orgânicos, incluindo o ácido acético, metanol, compostos aromáticos, derivados fenólicos, aldeídos e breu ou piche) e, por fim, material sólido, carvão vegetal (REZENDE, 2006). De acordo com o mesmo autor, é necessário que o ambiente para sua produção seja fechado e permita condições controladas de oxigênio. O processo de carbonização ocorre em temperaturas superiores a 150°C, com temperatura final máxima desejável de 500°C, com o rendimento do processo variando em função da qualidade da madeira (densidade, umidade e teor de lignina) e da tecnologia de conversão empregada, ou seja, do tipo de forno.

Diversas reações químicas ocorrem durante o processo de carbonização, as quais estão relacionadas com a temperatura que é submetida a madeira. Segundo Trugilho et al. (2001), na primeira etapa, com faixa de temperatura de 100 a 200°C, ocorre a secagem da madeira e a reação é endotérmica. Na etapa com faixa de temperatura entre 200 e 280°C ocorre a liberação de ácido acético, metanol, H₂O e CO₂ e a reação se mantém endotérmica. Entre 280 e 500°C, a reação passa a ser exotérmica e ocorre liberação de gases, como CO, CH₄ e alcatrões. Sob temperaturas acima de 500°C, ocorre liberação de pequenas quantidades de voláteis, especialmente o H₂.

O rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal produzido além de dependerem das características da madeira, estão associados ainda ao modo de condução da carbonização, mediante o controle da temperatura, da taxa de aquecimento e do tempo de exposição da madeira ao calor.

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, fatores dependentes da experiência do operador, refletindo em baixo rendimento gravimétrico e índices inferiores de qualidade do carvão vegetal (CARNEIRO et al., 2013).

Aspectos embasados nas variáveis da carbonização, tais como temperatura interna, pressão, taxa de aquecimento e vazão dos gases, estão sendo desenvolvidas para reduzir a subjetividade do controle do processo, visando a maximização da produção de carvão vegetal com elevados índices de qualidade e melhorando as condições de trabalho nas unidades produtoras.

De acordo com Raad (2001), a produção de carvão vegetal com monitoramento da temperatura interna dos fornos auxilia na tomada de decisão, proporciona maior controle da carbonização e do resfriamento do forno, resultando em ganhos representativos no rendimento gravimétrico. Carvalho et al. (2012) afirmaram que, com o controle da temperatura, pode-se evitar elevações indesejáveis de temperatura seja durante a carbonização ou resfriamento dos fornos, 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.

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram verificar o efeito do controle da carbonização por meio da temperatura interna em forno circular no rendimento gravimétrico em carvão vegetal e nas propriedades do mesmo e elaborar o perfil térmico do forno durante a carbonização e resfriamento.

Material e Métodos

O forno avaliado do tipo circular de superfície está localizado na unidade experimental de carvão vegetal do

Laboratório de Painéis e Energia da Madeira na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-Minas Gerais. Construído em alvenaria, com diâmetro interno de 3 m, altura das paredes de 1,5 m e altura central de 2,2 m e capacidade de enformamento de 12 estéreos (9 m³) de madeira. Na base do forno existem seis aberturas para entrada de ar (“tatus”). Este tipo de forno é de fácil construção, sendo bastante difundido entre os produtores de carvão, bastante observado no Estado de Minas Gerais.

O forno circular está conectado por meio de ductos a uma fornalha central para a combustão dos gases gerados durante a carbonização. A fornalha é de formato cilíndrico, com diâmetro interno de 1,6 m e altura de 1,1 m, sendo composta por um sistema de alimentação dos gases, câmara de combustão, sistema de admissão de ar primário e chaminé. A chaminé foi construída sobre a fornalha, com diâmetro interno inferior de 1,6 m, superior de 0,40 m como apresentado na Figura 1.

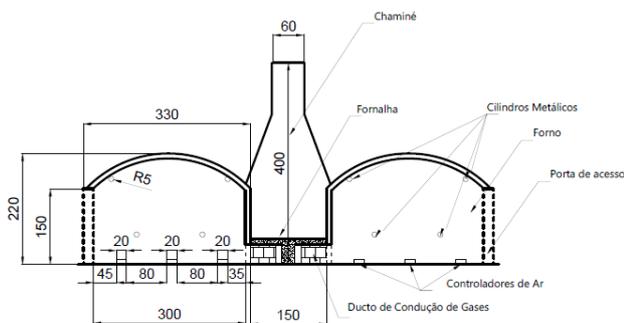


Figura 1. Croqui ilustrativo do sistema forno de superfície acoplado à fornalha para queima dos gases.

Figure 1. Drawing show the kiln system connected to the furnace for burning gases.

Controle da carbonização

Foram realizadas quatro carbonizações utilizando-se madeira de *Eucalyptus* spp., com 7 anos de idade, diâmetro das toras variando de 10 a 30 cm e altura de 1,50 a 2,20 m, proveniente de plantio comercial com espaçamento 3x3 m,

localizado na cidade de Viçosa-MG. A densidade básica média do material é de 420 kg.m⁻³ e umidade média, em base seca, de 42%.

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 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.

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, representados na Figura 1. Os cilindros foram instalados ao longo do perímetro do forno. Durante a carbonização, a temperatura foi tomada de uma em uma hora e no resfriamento de oito em oito horas (h).

Tabela 1. Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização no sistema forno-fornalha, para as fases e tempos de manutenção, a serem mensuradas na cúpula do forno.

Table 1. Theoretical tracks temperature for carbonization control in kiln-furnace system, to be measured at dome of kiln.

Fase	Faixa de Temperatura	Tempo de manutenção
I	100-150°C	15-16 h
II	150-275°C	11-12 h
III	275-400°C	23-24 h
IV	400-470°C	17-18 h

Fonte: Oliveira et al. (2013).

Na primeira carbonização, o controle foi realizado pela observação dos controladores de ar, do avanço da frente de

carbonização, medindo-se e registrando-se as temperaturas, não sendo realizadas intervenções com base nas temperaturas medidas. Nas outras três carbonizações, o controle da carbonização foi realizado com base em faixas teóricas de temperatura descritas por Oliveira et al. (2013), apresentadas na Tabela 1.

De acordo com as temperaturas obtidas durante o monitoramento da carbonização, principalmente na parte superior do forno, procedeu-se o fechamento ou a abertura das entradas de ar, e conseqüentemente, o controle da carbonização foi realizado em função das faixas teóricas de temperaturas apresentadas (Tabela 1).

Após o resfriamento do forno, procedeu-se sua abertura, realizando-se a descarga e pesagem do carvão, dos finos (carvão com granulometria inferior a 12,7 mm) e atíços (madeira parcialmente carbonizada). O rendimento gravimétrico da carbonização foi determinado pela divisão das massas dos produtos obtidos pela massa seca de madeira enforada.

Mapa térmico

As temperaturas de cada carbonização foram registradas em intervalos de 1 em 1 hora durante a carbonização e em intervalos de 8 em 8 h durante o resfriamento do forno circular de superfície.

A partir das temperaturas obtidas pelos quatro pontos de medição da cúpula e dos quatro pontos instalados nas paredes do forno, realizou-se o mapeamento térmico do forno durante a carbonização que teve rendimento gravimétrico em carvão vegetal mais próximo ao valor médio das três carbonizações realizadas.

O mapa térmico foi elaborado a partir das temperaturas registradas durante a carbonização e o resfriamento por meio do *software* Surfer 9.0, que representa em cores a evolução da temperatura ao longo do tempo.

Propriedades do carvão vegetal

A densidade a granel foi determinada conforme os procedimentos da Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 6922, Associação Brasileira de Normas Técnicas - (ABNT, 1981). A densidade relativa aparente foi determinada conforme os procedimentos da NBR 9165, (ABNT, 1985).

O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi determinado por meio da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a NBR 8633, (ABNT, 1984). A determinação dos teores de materiais voláteis (TMV), cinzas (TCZ) e carbono fixo (TCF) seguiram os procedimentos preconizados na NBR 8112 (ABNT, 1986).

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 ± 2 °C, até atingirem massa constante. O teor de umidade foi calculado pela divisão da massa de água presente no carvão pela massa seca de carvão.

A determinação da friabilidade do carvão foi realizada segundo a metodologia do Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, para carvão vegetal, citado por Oliveira et al. (1982), adaptada, ao empregar uma amostra de 130 g de carvão, ao invés das 500 g, com granulometria inferior a 60 mm e superior a 20 mm, com o emprego de um friabilômetro de bancada.

Resultados e Discussão

Rendimento gravimétrico

Na Tabela 2 são apresentados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, atíço e finos para a primeira carbonização, sem controle por temperatura e a média das carbonizações com controle pela temperatura interna do forno circular de superfície.

Tabela 2. Rendimentos gravimétricos de carvão vegetal, atíço e finos para a carbonização sem e com controle de temperatura.

Table 2. Gravimetric yield of charcoal, semi-carbonized wood and fines for carbonization with and without temperature control.

Carbonização	Rendimento (%)		
	Carvão	Atíço	Finos
Sem controle de temperatura	26,40	21,60	4,10
Com controle de temperatura*	33,18 (5,17)	8,85 (45,06)	3,23 (6,86)

*Média e coeficiente de variação (CV) das três carbonizações com controle de temperatura interna do forno.

Para a carbonização com o controle subjetivo, o rendimento em carvão foi de 26,40%, valor inferior ao padrão para este tipo de forno. De acordo com Mendes et al. (1982), nos fornos circulares de superfície, quando não há queima da fumaça, o acompanhamento e controle da carbonização é realizado pela coloração da fumaça expelida pela chaminé e inspeção visual das aberturas para entrada de oxigênio (“tatus”), possuindo normalmente, rendimento gravimétrico em carvão vegetal variável de 27 a 30%.

O elevado valor em porcentagem de atíço gerado (21,60%) demonstrou que apesar da frente de carbonização ter atingido os controladores de ar, o tempo de exposição às elevadas temperaturas não foram suficientes para realizar a transformação da madeira em carvão, devendo-se, portanto, controlar não somente a temperatura, mas também, o tempo de manutenção à determinada temperatura.

Nas carbonizações com controle pela temperatura interna, o rendimento médio em carvão vegetal foi de 33,18% e em atíço de 8,85%. Verificou-se que por meio do controle da carbonização pela temperatura interna do forno e com a adoção das faixas teóricas (Tabela 1), obteve-se considerável redução na geração de atíço e ganho na produção de carvão vegetal, valores superiores ao normalmente verificado para fornos circulares de superfície com controle da carbonização por mecanismos subjetivos (MENDES et al., 1982). O baixo

percentual de atíço gerado nestas carbonizações foi causado pelo incremento de temperatura na parte inferior do forno, conforme pode ser observado nos mapas térmicos representados nas Figuras 2 e 3.

Para as carbonizações realizadas, o percentual de finos variou entre 3 e 4%. O baixo valor verificado se deve às carbonizações não ultrapassarem os 480°C (Figuras 1 e 2), pois a elevada temperatura pode ocasionar maior degradação da madeira, elevando o teor de carbono fixo, tornando o carvão vegetal menos resistente, refletindo na maior geração de finos.

O rendimento gravimétrico médio em carvão vegetal para o forno circular de superfície avaliado foi superior ao verificado para outras tecnologias de conversão da madeira em carvão. Cardoso et al. (2010) ao realizarem carbonizações em forno retangular em escala reduzida, com madeira de *Eucalyptus* sp., controle da carbonização por temperatura e combustão dos gases em fornalha, denominado forno MF1-UFV, obtiveram rendimento médio de 29% em carvão, 4% de atíço e 4,3% de finos. Arruda et al. (2011) obtiveram 28,5% para rendimento em carvão vegetal para carbonizações em fornos retangulares com madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e controle da carbonização via temperatura interna.

Mapa térmico

O ciclo de carbonização da madeira no forno circular de superfície avaliado neste trabalho (Tabela 1), teve duração média de 120 h, sendo 72 h para carbonização da madeira e 48 h para ao resfriamento do forno e posterior retirada do carvão vegetal.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os mapas térmicos elaborados a partir das temperaturas registradas durante uma carbonização de madeira em forno circular de superfície.

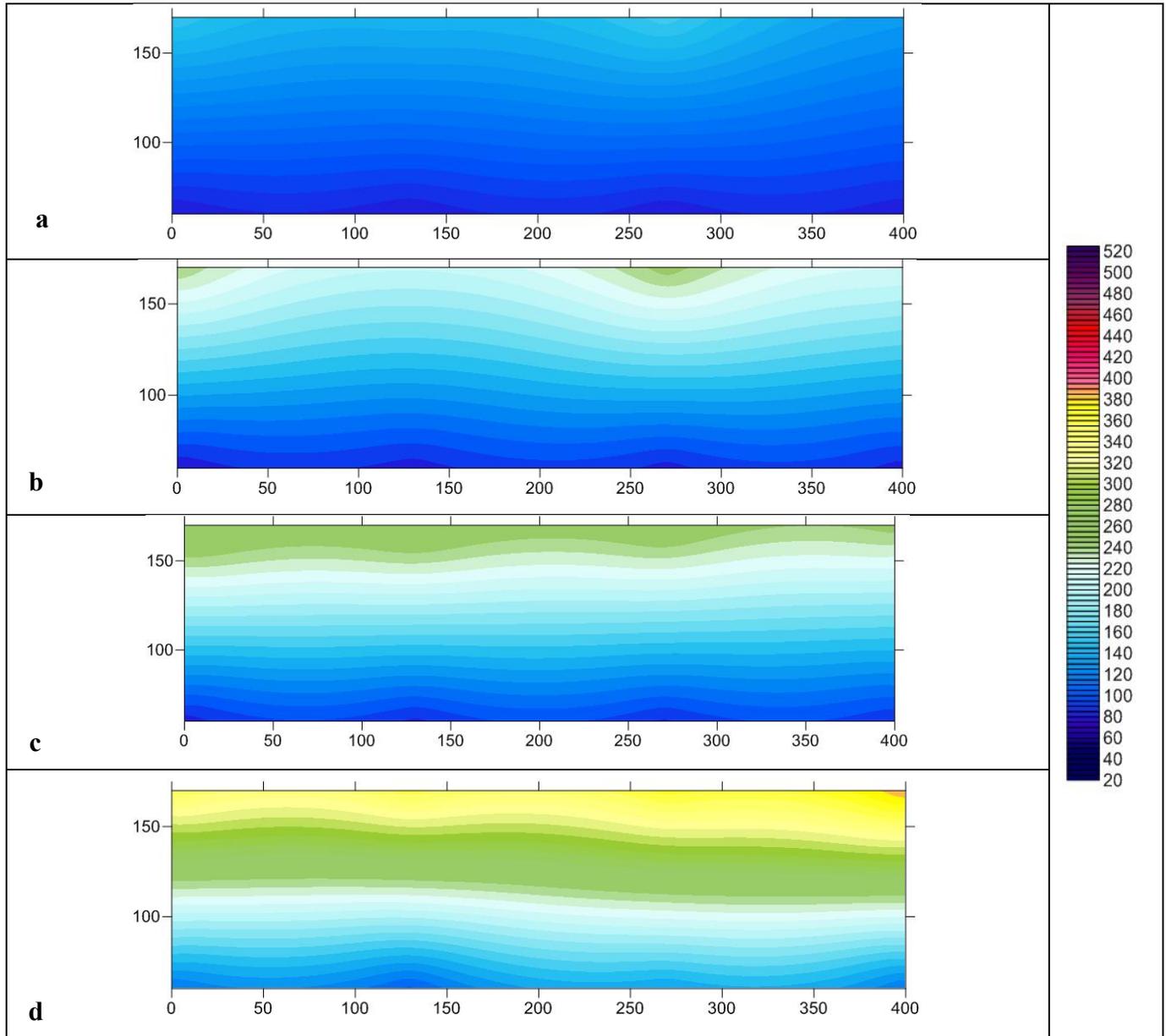


Figura 2. Mapas térmicos da fase inicial de carbonização em forno circular de superfície, em que eixo X = perímetro do forno (cm) e eixo Y = altura do forno (cm): a) 8 h; b) 16 h; c) 24 h; d) 32 h. A escala de cores (à direita da figura) representa as temperaturas em °C.

Figure 2. Thermal maps of the initial stage of carbonization on circular kiln, where X axis = perimeter of the kiln (cm) and Y axis = height of the kiln (cm): a) 8 hours, b) 16 hours, c) 24 hours, d) 32 hours. The color scale (located to the right of the figure) represents the temperature in °C.

Nas Figuras 2a e 2b está representada a primeira fase de carbonização, quando a temperatura máxima deve ser igual a 150°C, de acordo com a faixa teórica de temperatura pré-estabelecida (Tabela 1). Verificou-se que enquanto a parte superior do forno atinge temperaturas próximas a este valor, a parte inferior encontra-se a temperatura mais baixa, 70°C em média.

Após 24 h do início da carbonização, esta se encontra na segunda fase, cuja variação de temperatura compreende entre 150 e 275°C. De acordo com a Figura 2c, observou-se um perfil bastante variável de temperatura. Da base até a altura de 1,5m, a temperatura variou de 100 a 200°C (região azul), enquanto acima desta altura, as temperaturas variaram de 230 a 275°C (regiões verde e branca).

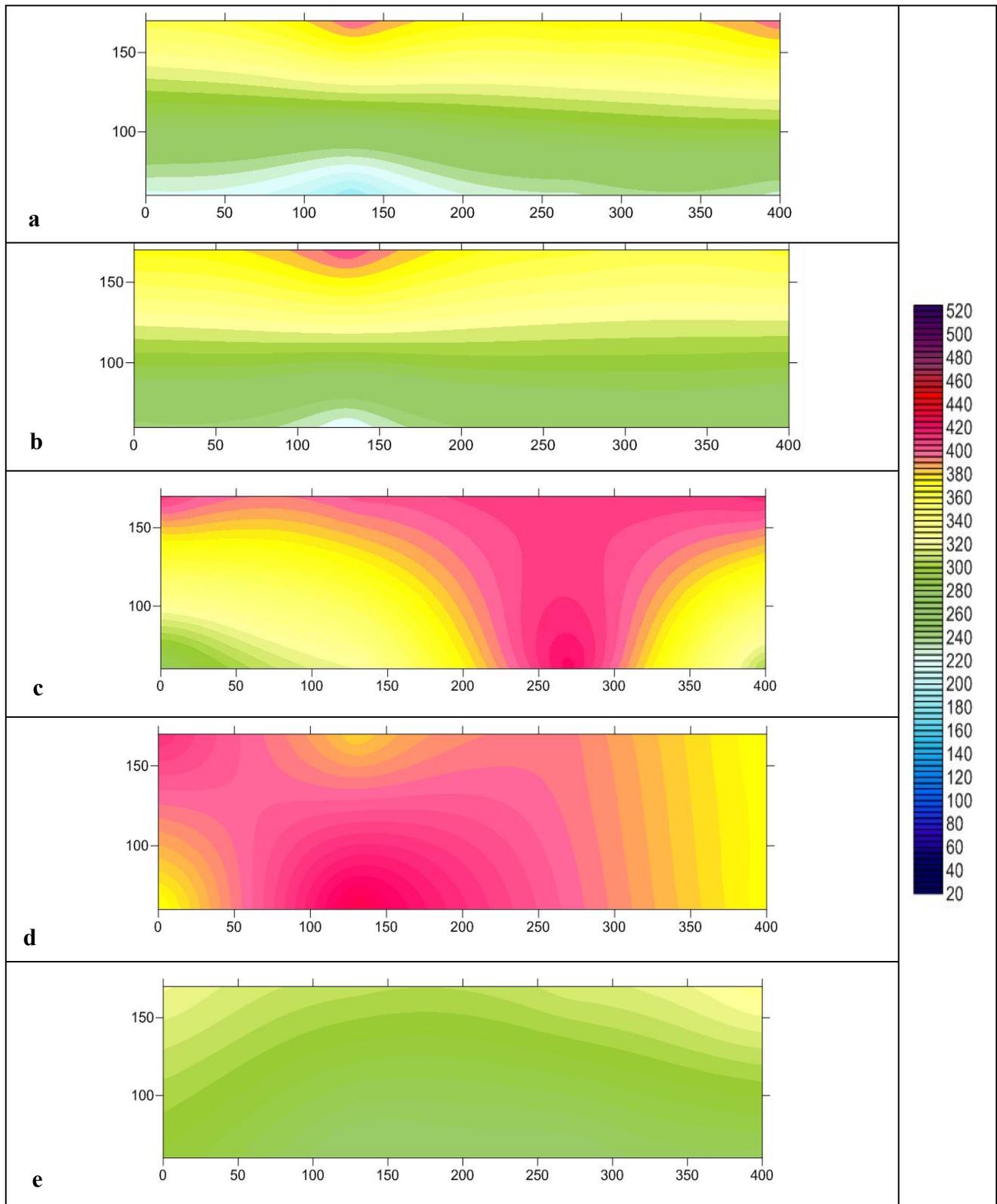


Figura 3. Mapas térmicos da fase final de carbonização em forno circular de superfície, em que eixo X = perímetro do forno (cm) e eixo Y = altura do forno (cm): a) 40 h; b) 48 h; c) 56 h; d) 64 h; e) 72 h. A escala de cores (à direita da figura) representa as temperaturas em °C.

Figure 3. Thermal maps of the final stage of carbonization on circular kiln, where X axis = perimeter of the kiln (cm) and Y axis = height of the kiln (cm): a) 40 hours, b) 48 hours, c) 56 hours, d) 64 hours, e) 72 hours. The color scale (located to the right of the figure) represents the temperature in °C.

A diferença de temperatura, superior a 100°C, entre a parede e a cúpula do forno deve-se à necessidade de manutenção dos controladores de ar parcialmente fechados para que a temperatura da cúpula não se elevasse além do limite estabelecido, nesta fase, 275°C.

Na Figura 2d observa-se quatro regiões distintas de temperatura no interior do forno circular de superfície. A primeira, acima de 1,5 m, verificou-se temperaturas entre 300 e 320°C (região amarela); abaixo de 1,5m, até a altura de 1m, duas faixas; uma com variação de temperatura de 240 a 300°C (verde) e outra de 200 a 240°C (branca). Na última região, abaixo de 1m, verificou-se temperatura mínima de 140°C (região azul).

Nas Figuras 3a e 3b está representada a terceira fase de carbonização, momento em que a temperatura deve variar de 275 a 400°C. Observam-se duas regiões bem distintas, em que na parte superior encontram-se temperaturas de 320 a 380°C (região amarela), com alguns pontos acima de 400°C, com máximo de 420°C (vermelha); e na parte inferior do forno, as temperaturas variaram de 240 a 320°C, tendo alguns pontos inferiores a 200°C (região verde).

A última fase de carbonização está representada nas Figuras 3c, 3d e 3e. Nas Figuras 3c e 3d, observa-se que a parte inferior atingiu temperaturas acima de 340°C, favorecendo a produção de carvão vegetal ao promover a completa conversão da madeira em carvão, reduzindo a geração de atíço. Na Figura 2c a distribuição irregular da temperatura pode ser explicada em função da frente de carbonização estar atuando mais intensamente devido a intervenções realizadas no processo. Ainda nestas figuras, observam-se duas regiões distintas de temperatura em todo o forno circular; uma com variação da temperatura de 340 a 400°C (região amarela) e outra variando de 400 a 470°C (região vermelha).

Na Figura 3e, verifica-se que houve queda da temperatura, mesmo ainda ocorrendo a carbonização da madeira. Neste

instante (72 h), a parte inferior do forno atingiu temperaturas em torno de 290°C, enquanto a temperatura máxima da parte superior foi de 370°C.

Esta redução natural da temperatura interna do forno circular de superfície indica o fim da carbonização e então realizou-se o fechamento de todas as entradas de ar (controladores e saída de gases do forno) para iniciar o resfriamento.

De acordo com as Figuras 2 e 3, observa-se que mesmo com o controle adequado da carbonização não foi alcançada a homogeneidade das temperaturas no interior do forno, sendo a temperatura da parte superior (cúpula) maior que a temperatura da parte inferior (parede). Condição semelhante foi relatada por Carvalho et al. (2012), que ao realizarem carbonizações em fornos retangulares com controle da temperatura interna por meio de um sistema supervisor de coleta e armazenamento de dados, observaram que durante a carbonização da madeira, a diferença de temperaturas entre a parte superior e a inferior do forno variava em média, em 50°C. Segundo estes mesmos autores diferentes regiões do forno tinham diferentes temperaturas, o que torna a produção de carvão heterogênea, variando também a geração de atíço e cinzas no interior do forno.

Na Figura 4 são apresentados os mapas térmicos elaborados a partir das temperaturas registradas durante o resfriamento do forno circular de superfície. Após 72 h do ciclo de carbonização da madeira no forno circular de superfície, realizou-se o fechamento e vedação das possíveis entradas de ar. Verificou-se que não houve entrada de ar (oxigênio) no forno durante o resfriamento, já que não foi observada nenhuma elevação de temperatura neste período, conforme Figura 4.

Diferente do verificado durante a carbonização, no resfriamento a queda de temperatura ocorreu de maneira homogênea, verificando-se diferença média de temperatura,

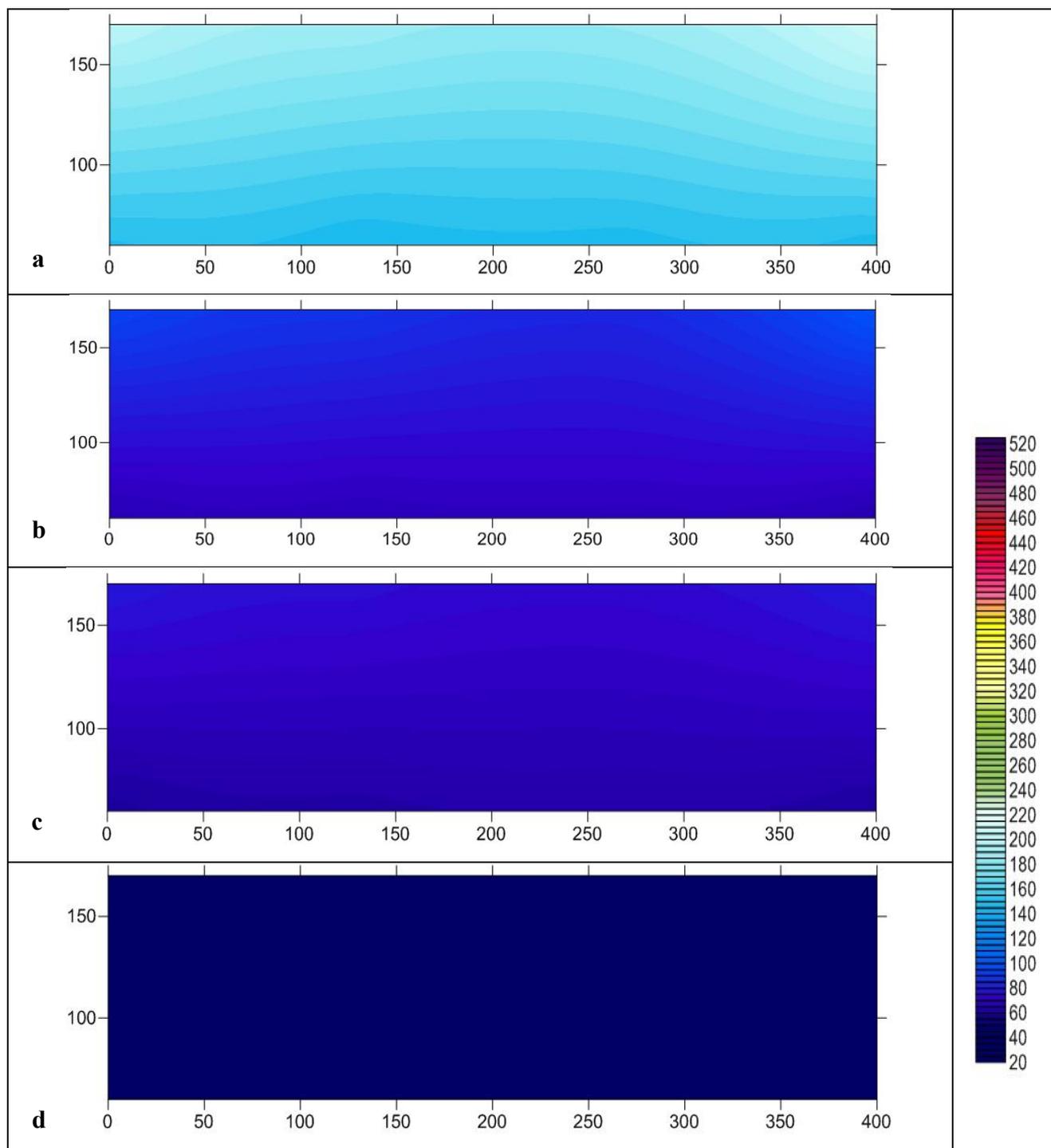


Figura 4. Mapas térmicos do resfriamento em forno circular de superfície, em que eixo X = perímetro do forno (cm) e eixo Y = altura do forno (cm): a) 80 h; b) 96 h; c) 104 h; d) 120 h. A escala de cores (à direita da figura) representa as temperaturas em °C.

Figure 4. Thermal maps of cooling on circular kilns, where X axis = perimeter of the kiln (cm) and Y axis = height of the kiln (cm): a) 80 hours, b) within 96 hours; c) 104 hours, d) 120 hours. The color scale (located to the right of the figure) represents the temperature in °C.

de 30°C, entre a parte superior e a inferior do forno, conforme observado na Figura 4. Carvalho et al. (2012) também verificaram que durante o resfriamento, as temperaturas

internas do forno tendem a se igualarem rapidamente, diferentemente do observado durante a carbonização. Nos instantes de tempo de 80 e 88 h do ciclo total de carbonização

(Figuras 4a e 4b), a temperatura média do forno está próxima à 200°C (azul claro), reduzindo em média 150°C desde o fim da carbonização (Figura 3d). Somente depois de 96 h do ciclo total (24 h de resfriamento) foram verificadas temperaturas inferiores a 100°C (Figura 4c), e é a partir deste instante que a redução da temperatura interna do forno circular de superfície tornou-se mais lenta.

Na 104ª hora do ciclo (Figura 3c), o forno atingiu temperatura média igual a 60°C (azul). Para garantir a abertura do forno de forma segura e a descarga do carvão vegetal sem riscos de incêndios, a temperatura ideal de trabalho deve ser igual ou inferior a 40°C (azul escuro), alcançada somente após 120 h do ciclo total ou 48 h de resfriamento, conforme pode ser observado na Figura 4d.

Propriedades do carvão vegetal

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios das propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal produzido no forno circular de superfície com e sem controle da carbonização pela temperatura interna.

Para as propriedades do carvão vegetal, não foram observadas diferenças expressivas absolutas entre a carbonização sem controle de temperatura e a médias das carbonizações em que o controle de temperatura foi efetuado. Como o rendimento gravimétrico em carvão (Tabela 2) foi superior ao obtido pela carbonização testemunha, o controle de temperatura mostrou-se necessário já que aumentou a produção sem influenciar na qualidade final do produto. Sendo assim, as discussões a seguir foram pautadas apenas nos índices de qualidade para o uso siderúrgico do carvão vegetal produzido com o controle de temperatura.

Tabela 3. Valores médios das propriedades físicas, químicas e mecânica do carvão vegetal produzido no forno circular de superfície sem e com controle de temperatura.

Table 3. Average values of the physical, chemical and mechanical properties of charcoal produced on circular kilns without and with temperature control.

Propriedade	Carbonização sem controle de temperatura	Carbonização com controle de temperatura*
Densidade a Granel (kg.m ⁻³)	179	181 (3,16)
Densidade Aparente (kg.m ⁻³)	313	312 (5,97)
PCS (kcal.kg ⁻¹)	8091	8114 (0,63)
Umidade (%)	6,78	4,6 (30,07)
Teor de Materiais Voláteis (%)	16,21	17,07 (4,27)
Teor de Cinza (%)	0,65	1,00 (21,66)
Teor de Carbono Fixo (%)	83,14	81,93 (0,72)
Friabilidade (%)	16,27	15,28 (19,76)

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

O carvão apresentou densidade média a granel de 181 kg.m⁻³ e densidade aparente média de 312 kg.m⁻³. De acordo com Carneiro et al. (2013), para uso siderúrgico a densidade a granel deve ter valores superiores a 200 kg.m⁻³ e para a densidade aparente valores acima de 400 kg.m⁻³. Os valores inferiores de densidade do carvão obtidos neste estudo podem ser explicados pela baixa densidade da madeira utilizada (420 kg.m⁻³), pois, segundo Santos et al. (2012), durante a carbonização da madeira, em consequência de degradação térmica de seus principais componentes, perde-se em média 65% de massa. Geralmente, madeira com baixa densidade produz carvão com baixa densidade, se os parâmetros da carbonização forem mantidos os mesmos, já que a massa restante no carvão vegetal por unidade de volume será menor.

A umidade de equilíbrio higroscópico do carvão teve valor médio igual a 4,60%, valor este, em conformidade com as especificações do setor siderúrgico que utiliza o carvão vegetal como termorreduzidor. Para Carneiro et al. (2013), esta

variação pode estar entre 1 e 6%, em que 4% é o valor ideal de umidade para o carvão vegetal.

O poder calorífico superior (PCS) médio do carvão foi de 8.114 kcal.kg⁻¹. Pereira et al. (2012), ao avaliarem a qualidade do carvão vegetal de diferentes clones de eucalipto produzido em forno mufla,, obtiveram valores de PCS variando entre 7.070 e 7.616 kcal.kg⁻¹. Já Cardoso et al. (2010) obtiveram 7.929 kcal.kg⁻¹ como valor médio de PCS para o carvão vegetal produzido no forno MF1-UFV com madeira de *Eucalyptus* sp.

O elevado poder calorífico do carvão vegetal obtido nas carbonizações no forno circular de superfície pode ser explicado pelo teor de carbono fixo superior a 80% (Tabela 3). Este fato ocorreu porque as carbonizações alcançaram temperaturas máximas variando entre 450 e 480°C. De acordo com Oliveira et al. (2010), a temperatura final influencia a qualidade do carvão vegetal e que carbonizações com temperatura final próximo a 450°C tendem a produzir maior rendimento em carvão vegetal e elevado poder calorífico e teor de carbono fixo em sua constituição.

O percentual de cinzas do carvão foi igual a 1%, valor menor ao encontrado por Oliveira et al. (2010). O teor de materiais voláteis foi de 17,07%, enquanto o teor de carbono fixo foi de 81,93%. Segundo Carneiro et al. (2013), a faixa desejada de carbono fixo no carvão para uso siderúrgico está compreendida entre 75 e 80%. O elevado teor de carbono fixo deve-se a temperaturas finais de carbonização superiores a 450°C, confirmando-se que a temperatura deve ser controlada, a fim de se obter índices de qualidade do carvão desejáveis para a siderurgia.

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 encontrados por esses autores foram inferiores ao verificado para o carvão vegetal

produzido nas carbonizações realizadas no forno circular de superfície, enquanto o teor de materiais voláteis foi superior.

O índice de friabilidade média do carvão vegetal foi igual a 15,28%, especificamente classificado como friabilidade média segundo a classificação do CETEC, citado por Oliveira et al. (1982). Cardoso et al (2010), ao determinarem a friabilidade do carvão vegetal produzido no forno MF1-UFV com queima de gases na fornalha, obtiveram índice de 16,41%, sendo o carvão considerado mediamente friável.

Conclusões

O controle da carbonização pela temperatura interna em forno circular de superfície, mensurada por meio de sensor infravermelho, proporcionou aumento no rendimento gravimétrico em carvão vegetal além da redução na geração do atíço.

O carvão vegetal produzido no forno circular possui qualidade satisfatória para sua utilização aos diversos fins ao qual se destina, principalmente siderúrgico.

Os mapas térmicos elaborados mostraram a heterogeneidade da temperatura interna entre a parte inferior e superior do forno, principalmente durante a carbonização. O resfriamento foi homogêneo, evidenciando a boa vedação do forno ao fim da carbonização.

O controle da temperatura interna do forno permitiu o incremento do monitoramento do ciclo de carbonização, resultando em aumento da produtividade do carvão vegetal.

Referências

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6922**: Determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro, 1981.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6923**: Carvão vegetal: amostragem e preparação de amostra. Rio de Janeiro, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.
- 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.
- 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. 118p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG. 2008.
- CARDOSO, M. T.; CARNEIRO, A. C. O.; DAMÁSIO, R. A. P.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; MARTINS, M. C.; SANTOS, R. C. Efeito da combustão dos gases da carbonização no rendimento gravimétrico da madeira de *Eucalyptus* sp. 2010. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 20-31. 2010.
- CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A.C.; PEREIRA, B. L. C. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. **Bioenergia & Biorrefinaria – Cana-de-Açúcar & Espécies Florestais**. 1. ed. Viçosa, MG: Os Autores, 2013.
- CARVALHO, S. R.; BORGES, V. L.; MULINA, B. H. O.; OLIVEIRA, R. L. M.; FIGUEIRA JÚNIOR, E. A.; PESSOA FILHO, J. S. Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria. 2012. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 36, n. 4, p. 787-796. 2012.
- 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.
- PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. 2012. **International Journal of Forestry Research**. v. 1, n. 2, p. 1-8. 2012.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. 2013. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 37, n. 3, p. 557-566. 2013.
- 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. 2010.
- OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P. A. Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos. In: **Produção e utilização do carvão vegetal**. 1982. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, p. 60-73, 1982.
- 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, p. 8-11. 2001.
- REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal - importância do conhecimento fundamental**. 2006. Belo Horizonte - MG. 2006.
- SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. 2012. **Revista Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151. 2012.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. 2001. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 114-201. 2001.