



MONITORAMENTO DO PROCESSO DE PIRÓLISE EM FORNOS DE ALVENARIA DO TIPO CIRCULAR

Paulo Augusto Costa¹; Joselane Priscila Gomes da Silva²; Wagner Patrício De Sousa Junior ³; Vinícius Orlandi Barbosa Lima⁴; Rose Clara Lopes Vieira⁵; Alessandro de Paula ⁶

¹ Engenheiro Florestal, Supervisor de Operações Aeroagrícolas Remotas, Emflora Empreendimentos e Serviços Florestais, LTDA., São Mateus, ES. E-mail: pauloflorestall@gmail.com; ² Engenheira Florestal, Pós-Doutoranda em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *Campus* Vitória da Conquista, BA. E-mail: joselane.gomess@gmail.com; ³ Engenheiro Florestal, Professor do Departamento de Engenharia Florestal, Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, *Campus* Salinas, MG. E-mail: wagner.junior@ifnmg.edu.br; ⁴ Engenheiro Florestal, Professor do Departamento de Engenharia Florestal, Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, *Campus* Salinas, MG. E-mail: vinicius.orlandi@ifnmg.edu.br; ⁵ Discente do Curso de Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *Campus* Vitória da Conquista, Ba. E-mail: roselopeslv@gmail.com; ⁶ Engenheiro Florestal, Professor do Departamento de Engenharia Agrícola e Solos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *Campus* Vitória da Conquista, BA. E-mail: professor@uesb.edu.br

RESUMO

O Brasil é o maior produtor e um dos maiores consumidores de carvão vegetal do mundo, sendo parte dessa produção realizada em fornos rudimentares de alvenaria. Diante disso, o objetivo deste estudo foi monitorar o processo de carbonização em fornos circulares de alvenaria, para identificação de pontos de melhoria e sugestão de aperfeiçoamento do processo. O estudo foi desenvolvido em uma Planta de Carbonização localizada na Fazenda Rio Claro, Arinos, Minas Gerais. A madeira utilizada foi proveniente do *Eucalyptus urograndis*. O monitoramento foi dividido em duas rotinas de carbonização, coletando informações de três fornos em cada uma. Para determinação do perfil térmico, foram coletados dados da temperatura em quatro pontos distribuídos de forma padronizada ao longo do perímetro das paredes laterais de cada forno, na altura de 60 cm do solo, com intervalo de 2 em 2 horas no período de carbonização e 8 em 8 horas no período de resfriamento. A partir das taxas de aquecimento e resfriamento, foi apontado como ações do processo convencional de controle dos gases influencia na evolução da temperatura. Para o cálculo do fator de conversão, foram coletados dados de volume de madeira enforada e volume de carvão produzido. A temperatura média final de carbonização foi de 366,39°C para a primeira carbonização e de 501,79°C para a segunda. A segunda rotina carbonização apresentou a melhor taxa de conversão.

Palavras-chave: Biomassa; *Eucalyptus urograndis*; Siderurgia.

1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal se constituiu como uma importante matéria prima para setor siderúrgico nacional, uma importante *commodity* extraída da madeira por meio do processo de pirólise, destacando a madeira e suas propriedades como fator importante

e com influência direta na qualidade do carvão após o processo de carbonização (FROEHLICH & MOURA, 2014).

Diante disso, a utilização de carvão vegetal pelo setor siderúrgico para produção de aço e ferro-gusa e de liga faz desta matéria prima um importante combustível redutor, visto que é renovável, gera baixo teor de cinzas, enxofre e fósforo (SILVA & CASTRO, 2014). Sendo assim, o presente trabalho teve por objetivo monitorar o processo de carbonização em fornos circulares de alvenaria para identificação de pontos de melhoria e sugestão de aperfeiçoamento do processo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma planta de carbonização localizada na Fazenda Rio Claro, Arinos – Minas Gerais. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Aw com inverno seco, a temperatura média anual varia de 22 a 24 °C e precipitação anual de 1.000 a 1.300 mm (ALVARES et al., 2013). O bioma é o Cerrado e a fitofisionomia é o Cerrado sentido restrito (IBGE, 2012).

A madeira utilizada foi proveniente do *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, desenvolvido pela empresa Acesita Energética (NEVES et al., 2011), comercializado como clone 144, popularmente conhecido como *E. urograndis*, plantado em espaçamento de 3 x 2m, com 7 anos de idade.

O forno de alvenaria utilizado no processo de carbonização (Figura 1 A-B) foi construído de tijolos e barro argiloso, com uma cinta metálica na parte superior das paredes laterais, possuindo oito aberturas laterais na parte inferior (tatus), para a entrada de ar, e 4 aberturas laterais na parte superior (baianas), para o auxílio da expulsão dos gases na fase inicial do processo, possui também, uma entrada de ar na porta e uma chaminé. O volume interno de cada forno era de 51,93 m³, com capacidade máxima de enfiar 48 st de lenha.



Figura 1 – Ilustração do forno utilizado no processo de carbonização na Fazenda Rio Claro, Arinos – Minas Gerais. A. Construção do forno de alvenaria; B. Vedação da boca do forno após o preenchimento. Fonte: Costa (2021).

O experimento foi conduzido em seis fornos, sendo dividido em dois ciclos de carbonização, cada ciclo com três fornos. Em cada ciclo, foi realizado o acompanhamento da carbonização coletando informações de volume da madeira enfornada, temperatura interna e rendimento gravimétrico.

A determinação da umidade da madeira foi realizada pelo método capacitivo com o sensor Ecoscam modelo eco 10 em três toras de três classes de diâmetro 8-10, 12-14 e 16-18 cm de diâmetro, retirando seções de 10 cm de comprimento, duas nas pontas e uma no meio de cada tora. Para o ajuste (calibração) do aparelho, foi realizado o ajuste na intensidade do campo elétrico, sendo aplicado na madeira na hora da mensuração, esse ajuste varia de acordo com a densidade básica da madeira, para o clone 144 foi regulado em $0,49 \text{ g/cm}^3$ (PROTÁSIO et al., 2014; SILVA et al., 2016).

O volume de madeira utilizada foi determinado a partir da mensuração de três alturas nos dois lados de pilhas de madeira em uma carreta, antes de serem descarregadas, multiplicando a altura média pelo comprimento das toras e pela largura da carreta foi obtido o volume em estéreo de lenha de cada pilha. Após a mensuração, com o auxílio de uma grua, foram descarregadas quatro pilhas em cada forno, para serem enfiadas de forma manual.

Para a obtenção das temperaturas foi utilizado o sensor infravermelho Minpa do modelo MT-350^a capaz de detectar a faixa de -50°C a 800°C (Figura 2 A-B). A coleta foi realizada com intervalo de 2 horas no período de carbonização e de 6 horas no período de resfriamento, durante nove dias. O período de carbonização foi considerado da ignição até a vedação completa, e o resfriamento foi da vedação até a temperatura constante. A determinação do volume de carvão foi feita com o auxílio de uma mini carregadeira para baldear o material e uma forma de 5 m^3 para mensurar o volume de carvão.



Figura 2 – Procedimento utilizado para monitoramento da temperatura durante o processo de carbonização. (A) Forno de alvenaria com detalhe da entrada dos cilindros metálicos; (B) obtenção da temperatura o sensor infravermelho Minpa do modelo MT-350^a. Fonte: Costa (2021).

2.1. Análise estatística

Os dados coletados foram avaliados por meio da estatística descritiva, utilizando a média como medida de tendência central, e como medida de variabilidade, o coeficiente de variação. Para cada forno foi calculado o volume médio, as taxas de aquecimento e resfriamento médias, o tempo médio de carbonização e resfriamento, e ainda o fator de conversão a partir da razão entre o volume enforado em estéreo de lenha e volume de carvão mensurado no final de cada processo. Os dados foram processados com o auxílio do Aplicativo *Microsoft Excel for Windows*™ 2013.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O percentual médio de umidade encontrado foi de 36%, superior ao valor obtido por Cardoso (2010) em clone *Eucalyptus* sp. com 5 anos de idade, na qual apresentou um percentual de umidade de 24,09%, segundo o mesmo autor, a faixa ideal para uma boa carbonização deve estar abaixo de 30% de umidade.

A temperatura final média da carbonização 1 foi de 366,39°C e da carbonização 2 foi de 501,79°C (Figura 3).

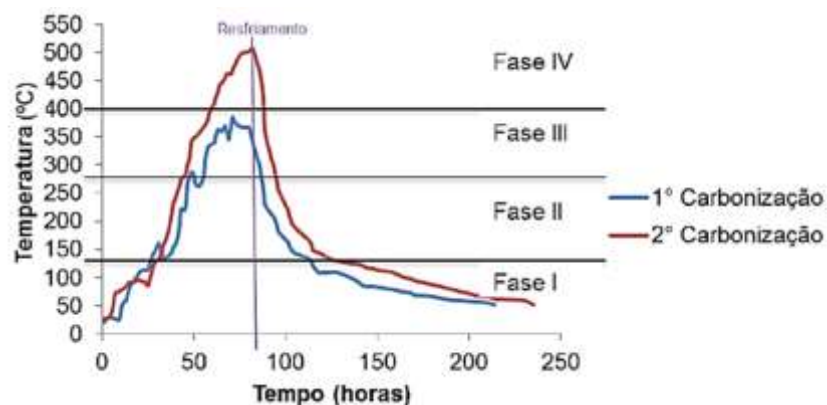


Figura 3 – Perfil térmico da primeira e segunda carbonização utilizando fornos de alvenaria circular, Fazenda Rio Claro, Arinos – Minas Gerais. Em que: Fase 1 = ocorre a secagem; a Fase 2 = reações endotérmicas; Fase 3 = reações exotérmicas; Fase 4 = liberação de voláteis e degradação térmica do carvão.

Rodrigues (2010), avaliando o processo de carbonização da madeira das respectivas espécies de *Eucalyptus urograndis*, *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. (macaúba) e *Eucalyptus* sp., observou que melhor temperatura final de carbonização foi 450°C, pois valores superiores a essa temperatura o rendimento gravimétrico tende a reduzir, devido à degradação térmica do material.

A segunda carbonização foi a que mais se aproximou do valor ideal de temperatura final e apresentou baixa quantidade de atíços. Já a primeira carbonização foi finalizada abaixo desse valor, indicando que o processo não ocorreu em todo o material inserido no processo, o que acarretou alto índice de atíços.

Na primeira fase, onde ocorre a secagem da madeira, as duas carbonizações apresentaram a evolução da temperatura semelhante (Figura 3), porém na transição para a segunda fase, a primeira carbonização diminuiu sua taxa de acréscimo de temperatura.

Além dos valores absolutos da temperatura, deve-se analisar também a velocidade do seu aumento, pois sua taxa de crescimento está diretamente relacionada com o rendimento e as características do carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 2010).

A taxa de aquecimento foi inversamente proporcional à taxa de resfriamento, pois a maior velocidade de aumento da temperatura desencadeia um maior do número de reações de liberação de energia em um espaço de tempo, diminuindo assim a capacidade de perca de energia desse material (Tabela 1).

Tabela 1 – Variáveis analisadas durante o processo de carbonização do clone 144 em forno de alvenaria, Fazenda Rio Claro, Arinos, Minas Gerais.

Forno	Variáveis analisadas									
	TM - °C	TA - °C/h	TR - °C/h	TC-h	TR ₁ - horas	Ci horas	D	Vol - st	V- mdc	St/mdc
1ª	42,80	5,20	4,95	78	136	214	9	46,59	21,2	2,20
Carbonização										
CV %	13,85	11,48	21,53	7,54	4,30	0	0	1,01	7,16	6,77
2ª	523,73	6,34	4,55	79	144	224	9	46,66	24,28	1,93
Carbonização										
CV %	4,88	2,37	41,14	5,82	7,60	6,93	6,93	1,11	7,29	6,58

Em que: Ci = ciclo em horas; CV = Coeficiente de Variação; D= Dias; St = estéreo.TA = taxas de aquecimento em °C/hora; TC = Tempo de carbonização em horas; TM = Temperatura máxima em °C; TR = taxa de resfriamento em °C/hora; TR₁ = tempo de resfriamento em horas; Vol = Volume de lenha em st; V = Volume de carvão, mdc.

As duas carbonizações apresentaram tempos de aumento de temperatura semelhantes, mas devido às taxas de aumento serem divergentes, essas apresentaram períodos de resfriamentos diferentes (Tabela 1). A segunda carbonização apresentou maior rendimento da conversão do volume em estéreo de lenha em metro de carvão, convertendo cerca de 52%. A primeira carbonização apresentou percentagem de conversão de 45,5%, essa menor taxa de conversão se dá provavelmente devido às baixas temperaturas finais de carbonização, não chegando na quinta fase (acima de 370 C°). Ainda, pode estar relacionado ao forma de empilhamento dentro do forno, dimensões e forma das toras, podendo ter ocasionado mais espaços vários e não madeira.



4. CONCLUSÕES

A temperatura interna dos fornos se comporta de acordo com o controle da entrada e saída dos gases. A temperatura final de carbonização ideal fica em torno de 450 °C.

Existe a necessidade de treinamento operacional para os carbonizadores, ensinando-os como utilizar o pirômetro como parâmetro para manejar as entradas e saídas de gases.

É recomendada a mensuração da temperatura em diferentes alturas, para melhor visualização da variação da temperatura.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FROEHLICH, P. L.; MOURA, A. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Revista Tecnologia e Tendências**, v. 9, n. 1, p. 13-32, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: CDDI/IBGE, Série Manuais Técnicos em Geociências, n. 1, 2012. 271p

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. de P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O. VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, n. 68, p. 319-330, 2011.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. de 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. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

PROTÁSIO, T. de P.; NEVES, T. A.; REIS, A. A. dos; TRUGILHO, P. F. Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 465-477, 2014.

RODRIGUES, F. P.; SANTOS, L. L. ; CREPALDE, T. N. V. **Avaliação da temperatura final de carbonização sobre a qualidade do carvão vegetal de eucalipto**. 2010. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnólogo em Silvicultura) - Instituto Federal Minas Gerais, *Campus* São João Evangelista, São João Evangelista.

SILVA, J. C.; CASTRO, V. R. **Propriedade e usos da madeira de eucalipto**. Arbotec: Soluções Ambientais e Florestais, Viçosa, MG, 2014, 68p.