

Secagem da madeira utilizando gases combustos inseridos em diferentes layouts no piso do forno de carbonização

Evanderson Luis Capelete Evangelista¹, Angélica de Cassia Oliveira Carneiro¹, Dandara Paula da Silva Guimarães¹, Pedro Augusto Teixeira de Oliveira¹, Samuel Fernandes de Souza¹, Lawrence Pires de Oliveira¹

¹ Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa/MG, Brasil – lapem@ufv.br

Resumo: A secagem natural da madeira, leva meses para alcançar um teor de umidade inferior a 40%, recomendado para carbonização. Diante disso o objetivo da pesquisa foi realizar a secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador do sistema fornos-fornalha inseridos em diferentes posições no piso do forno de produção de carvão vegetal. A eficiência de secagem foi determinada considerando a redução do teor de umidade inicial da madeira em seis posições dentro do forno e ao longo da tora, parâmetro obtido por meio da pesagem inicial e final das amostragens. A copa do forno foi a região que teve a melhor eficiência de secagem (50,1%). Em relação ao perfil longitudinal da tora, a região central teve pior eficiência de secagem. Ambos os layouts foram eficientes na secagem da madeira, entretanto, o *layout* H foi mais homogêneo, obtendo um menor coeficiente de variação entre as posições.

Palavras-chave: Umidade da madeira, Eficiência térmica, Aproveitamento de coprodutos.

Drying wood using burning gases inserted in various layouts on the floor of the carbonization oven

Abstract: The natural drying of wood takes months to reach a moisture content below 40%, recommended for carbonization. Therefore, the research aimed to dry the wood inside the oven using the burning gases from the burner of the oven-furnace system inserted at different positions on the floor of the charcoal production oven. The drying efficiency was determined considering the reduction of the initial moisture content of the wood at six positions within the oven and along the log, a parameter obtained through the initial and final weighing of the samples. The oven canopy was the region that had the best drying efficiency (50.1%). Regarding the longitudinal profile of the log, the central region had the worst drying efficiency. Both layouts were efficient in drying the wood; however, layout H was more homogeneous, obtaining a lower coefficient of variation among the positions.

Keywords: Wood moisture, Thermal efficiency, Co-product utilization.

1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal desempenha um papel significativo como fonte de energia renovável e agente biorredutor no Brasil, contribuindo com 13% da produção mundial (FAO, 2024). Principalmente utilizado nos setores de ferro gusa e ferroligas, esse

insumo é vital para a indústria siderúrgica, com Minas Gerais se destacando como o principal produtor e consumidor, totalizando 14,58 milhões de metros cúbicos consumidos em 2022 (SINDIFER, 2023).

A qualidade do carvão vegetal na cadeia de produção está intrinsecamente ligada às características físicas, anatômicas e químicas da matéria-prima. Um fator crucial é o teor de umidade, que influencia diretamente o processo de carbonização e as propriedades do carvão resultante (Pinheiro, 2013). No entanto, a secagem demanda longos períodos de tempo estocada em campo, geralmente, entre 90 a 150 dias (Figueiró, 2022), para que atinja teores de umidade inferiores a 40% base seca, conforme recomendado pela Deliberação Normativa 227 do estado de Minas Gerais (COPAM, 2018).

Para lidar com esse desafio, diversas alternativas têm sido exploradas para reduzir o tempo de secagem da madeira. Uma delas é a secagem artificial em secadores metálicos utilizando os gases do queimador, embora isso implique em maiores custos (Cardoso, 2015; Figueiró *et al.*, 2018).

Outra alternativa é a secagem da madeira dentro do forno de carbonização, inserindo os gases combustos por uma tubulação instalada na parede lateral do forno de alvenaria. Método eficiente, mas evidenciou a necessidade de avaliar outros locais ou aumentar os pontos de inserção dos gases, para uma melhor homogeneização de secagem da carga de madeira (Siqueira, 2021).

Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a distribuição espacial e longitudinal da secagem artificial da madeira utilizando os gases combustos inseridos pelo piso do forno de carbonização visando aumento do rendimento gravimétrico e maximização da qualidade do carvão vegetal.

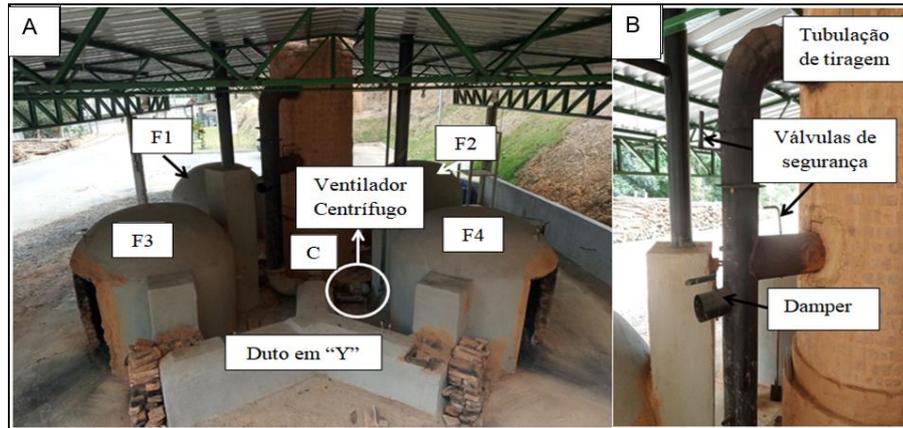
2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (UFV), conduzido em sistema forno-fornalha, composto por 4 fornos circulares, conectados a uma fornalha. A madeira utilizada foi do gênero *Eucalyptus sp.*, com 7 anos de idade. As toras utilizadas tinham comprimento médio de 1 m, separadas em três centros de classes de diâmetro: 9 cm, 12 cm e 15 cm com amplitude de ± 3 cm.

Utilizou-se dois fornos (F1 e F2) para carbonização e geração de gases. Estes foram queimados na câmara de combustão da fornalha e succionados a partir da

chaminé, com o auxílio de um ventilador centrífugo, e inserido pela parte inferior durante um período de três tempos diferentes (15, 22,5 e 30 horas), a temperatura de $170\pm 10^{\circ}\text{C}$ em outros dois fornos (F3 e F4) para secagem da madeira (Figura 1).

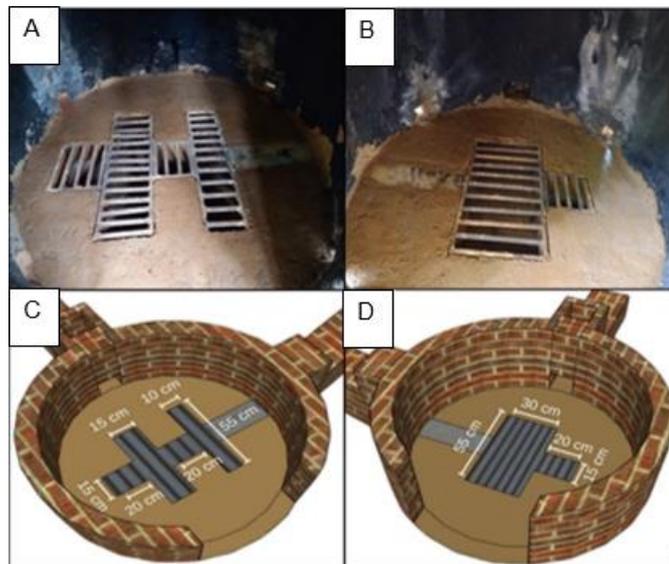
Figura 1. Componentes do sistema fornos-fornalha e do sistema de transporte dos gases combustos (A) e detalhes da tubulação de tiragem de gases combustos (B). F1 e F2: fornos de carbonização, F3 e F4: fornos de secagem, C a câmara de combustão.



Fonte: O autor.

A secagem da madeira foi avaliada em três tempos diferentes 15, 22,5 e 30 horas e em dois diferentes *layouts*, um em formato de H localizado na base do F3 e outro em formato de T, localizado na base do F4 (Figura 2).

Figura 2. Dutos de admissão dos gases combustos do queimador para a secagem da madeira dentro do forno, *layout* na forma H (A e C) e *layout* na forma T (B e D).



Fonte: O autor.

Para avaliar a secagem da madeira nas diferentes regiões do forno, estabeleceram-se seis posições: copa (Co); porta (P); lado do duto (LD); meio (M); lado oposto ao duto (LoD) e fundo (F). Para a copa amostrou-se 10 toretes de 15 cm e para as demais posições amostrou-se 3 toras-controles, em cada. Para avaliar a secagem da madeira, por posição na tora controle, após a secagem, foram retirados discos a 25%, 50% e 75% do seu comprimento, dos quais foram obtidos seus teores de umidade, base seca, objetivando avaliar a secagem no sentido base, centro e topo. A eficiência de secagem da madeira foi obtida a partir da redução do teor de umidade inicial da madeira. Estes parâmetros foram obtidos por meio da pesagem inicial e final da madeira, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetro de secagem obtido após a realização dos tratamentos

Parâmetro da secagem	Equação
<i>Eficiência de secagem (%)</i>	<i>Eficiência de secagem (%)</i> $= \left(\frac{UBS_{inicial} - UBS_{pós-secagem}}{UBS_{inicial}} \right) \times 100$

UBSpós-secagem: teor de umidade, base seca (%) após a secagem da madeira; UBSinicial: teor de umidade, base seca (%) antes da secagem da madeira.

Para os dados foram utilizados testes de média (Tukey a 5% de significância). Todas as análises foram realizadas no software SISVAR.

Em relação a secagem por posição longitudinal na tora, foi feita uma imagem representativa de cada tratamento para ilustrar a eficiência de secagem por posição no forno e sentido longitudinal da tora de madeira, onde foi utilizado um gradiente de cores para diferenciar essa eficiência, cores em tons de vermelho a secagem foi mais eficiente, azul onde foi menos eficiente e amarelo foi intermediário.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, é observado que em ambos os *layouts* testados, a região da copa do forno foi significativamente a que promoveu melhor secagem e isso se deve a tendência dos gases quentes escoarem para essa área por possuírem baixa densidade. Assim, fornece mais energia térmica para que ocorra evaporação da água na madeira.

Tabela 2. Valores médios da eficiência de secagem (%), após secagem da carga total de madeira dentro do forno em diferentes *layouts* e posições da madeira

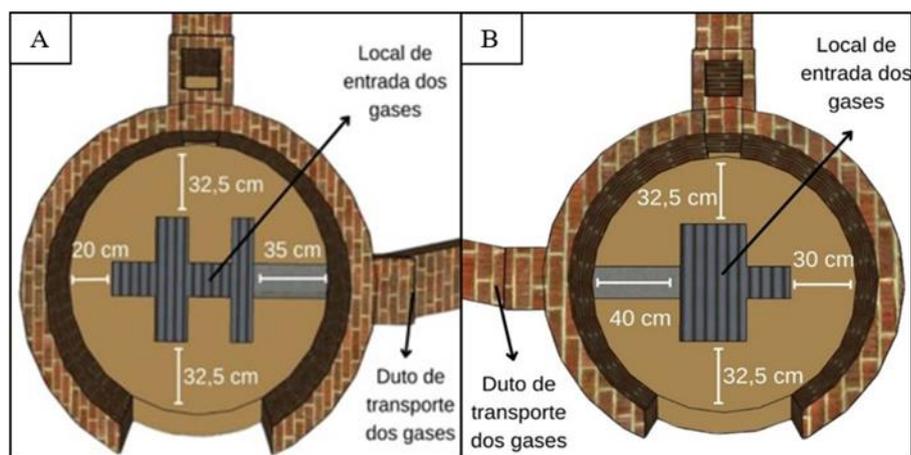
Layout	Posição da madeira dentro do forno						Média Geral
	P	LD	M	LoD	F	Co	
H	6,29 Ac	11,82 Ac	33,54 Ab	31,66 Ab	24,09 Ab	48,95 Aa	26,06
T	5,75 Ac	10,07 Ac	29,97 Ab	21,21 Bb	23,25 Ab	51,24 Aa	23,58
Média	6,02	10,95	31,76	26,44	23,67	50,01	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha ou mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente a 5% de significância pelo teste Tukey. P: porta; LD: lado do duto; M: meio; LoD: lado oposto ao duto; F: fundo e Co: copa.

Na região do meio do forno, as madeiras tiveram em média, uma redução de 31,76% no teor de umidade, sendo a segunda posição que mais colaborou para a secagem. Provavelmente, por possuir a maior área para entrada dos gases para dentro do forno, sendo esse, também, o primeiro local de contato com os gases, os quais estão em maiores temperaturas devido a menor perda térmica.

Em relação aos *layouts*, nota-se que o lado oposto ao duto (LoD) foi a única região que diferiu estatisticamente das demais posições e isso pode estar associado a menor distância de entrada dos gases nessa área do *layout* H em relação ao T (Figura 3), facilitando a permeabilidade dos gases com maior temperatura entre as toras de madeira nesse local.

Figura 3. Distância da entrada dos gases em relação as posições do forno nos *layouts* H (A) e T (B)



Fonte: O autor.

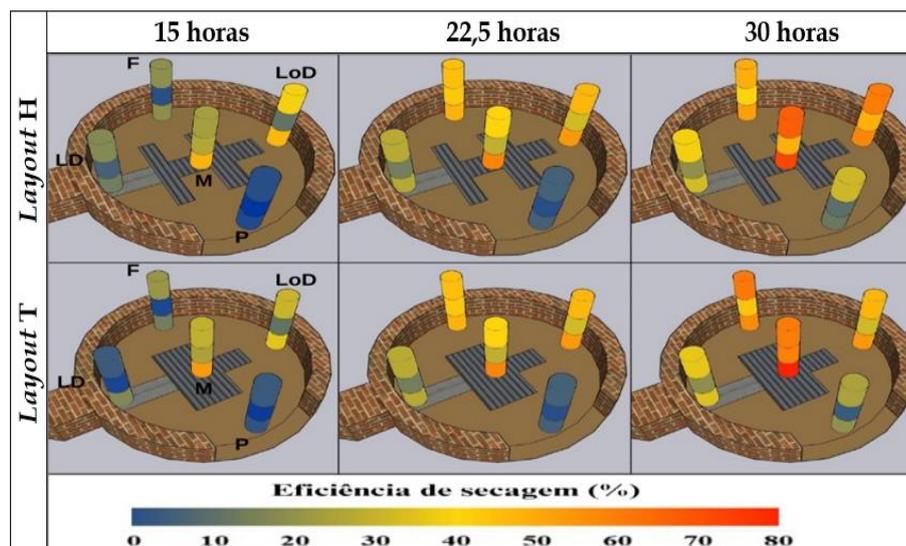
A região do fundo do forno (F), teve um maior fluxo de gases por estar próxima ao local de saída, chaminé, tendo assim, uma melhor eficiência de secagem em

relação a região da porta, apesar de terem a mesma distância de entrada dos gases. Observa-se que as posições do lado do duto e porta, LD e P, respectivamente, foram os locais onde as perdas de umidade foram menores, provavelmente, por estarem mais distantes da área de entrada dos gases, por estar oposto a tiragem dos gases pela chaminé e por maior impermeabilidade da carga, ocasionando maior perda térmica. Estes resultados podem indicar um menor deslocamento do ar e maior dificuldade de arraste da água retirada na secagem na porta e no lado direito, implicando em menor eficiência de secagem nessas regiões

Observa-se que em ambos os *layouts* não houve diferença significativa entre o meio (M), lado oposto ao duto (LoD) e fundo (F) do forno, indicando uma maior homogeneidade na secagem entre essas posições. Mas, ressalta-se que o *layout* H teve um coeficiente de variação (59,7%) menor que do *layout* T (68,8%), quando se relaciona todas as posições do forno.

Em relação a secagem no perfil longitudinal da madeira, a maior eficiência de secagem ocorreu no centro do forno e na base das toras, independente do *layout* de inserção dos gases, visto que este é o primeiro local de contato dos gases combustos com as toras de madeira dentro do forno, tendo maior quantidade de energia para realizar as trocas térmicas com a madeira (Figura 4).

Figura 4. Eficiência de secagem (%), por posição do forno, sentido longitudinal das toras de madeira em diferentes *layouts*, tempos e posições.



Fonte: O autor.

De modo geral, avaliando o perfil longitudinal de umidade, observa-se que a menor eficiência de secagem ocorre no centro da tora. Este comportamento se dá devido à inserção dos gases acontecer pelo piso do forno, favorecendo a secagem na base da tora. Além disso, os gases combustos tendem a se concentrar na copa do forno devido a sua menor massa específica, favorecendo a secagem no topo da tora, restando, dessa forma, menor quantidade de energia térmica para secar a região central das madeiras.

Ademais, ressalta-se que a permeabilidade da madeira tende a ser 100 vezes maior no sentido longitudinal em comparação aos sentidos radial e tangencial (Hein *et. al.*, 2016; Figueiró, 2022), dificultando a retirada de água no centro da tora.

4. CONCLUSÃO

A posição no forno com melhor eficiência de secagem foi a copa, devido à concentração dos gases quentes na parte superior, em relação as toras dispostas nas demais regiões do forno.

No perfil longitudinal da tora, a região central da tora de madeira seca menos em relação as demais, devido à inserção de gases pelo piso forno, que favorece a transferência de calor e também pelo acúmulo de gases quentes na copa do forno, favorecendo a secagem da ponta da tora.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à empresa ArcelorMittal BioFloresta, à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), à Sociedade de Investigações Florestais e a EMBRAPA Unidade Fibras Florestais.

6. REFERÊNCIAS

CARDOSO, M. T. **Secagem de toras para a produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases da carbonização**. 2015. 60 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental – MG. **Deliberação Normativa COPAM nº 227**, de 29 de agosto de 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS OF THE UNITED NATIONS – FAO DATABASE. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> . Acesso realizado em 29 de abril de 2024.

FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; RIBEIRO, G. B. D.; FERREIRA, F. B.; ALVEZ, L. M.; Secadores de madeira: uma alternativa sustentável para o aumento da produção de carvão vegetal. In: CARNEIRO, A. C. O.; SURDI, P. G.; **Coletânea de Trabalhos Científicos do Grupo G6**. Viçosa-MG, 182p. 2018. ISBN: 978.85.8179.159-6.

FIGUEIRÓ, C. G. **Secagem artificial de toretes de madeira de eucalipto para uso em retortas contínuas de carbonização**. 2022. 61 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022.

HEIN, P.R.G., CHAIX, G., CLAIR, B., BRANCHERIAU, L., GRIL, J. Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along Eucalyptus trunks grown under contrasting growth conditions. **Trees**, v.30, p.871–882, 2016.

PINHEIRO, M., A. **Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal**. 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SINDIFER – Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. **Anuário Estatístico 2023, ano base 2022**. Belo Horizonte, MG: SINDIFER, 27p., 2023.

SIQUEIRA, H. F. **Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira e produção de carvão vegetal**. 2021. 116 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2021.