

## **Secagem de toretes de madeira, em alta temperatura, visando aplicação em reatores contínuos de carvão vegetal**

Angélica de C. O. Carneiro<sup>1</sup>, Clarissa G. Figueiró<sup>1</sup>, Mateus A. Magalhães<sup>1</sup>, Ana M. M. L. Carvalho<sup>1</sup>, Danielly M. Gomes<sup>1</sup>, Lucas de F. Fialho<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Florestal (DEF), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa/MG, Brasil – [cassiacaarneiro1@gmail.com](mailto:cassiacaarneiro1@gmail.com).

**Resumo:** O objetivo foi fornecer subsídios teóricos para auxiliar no desenvolvimento de um secador industrial de madeira, na forma de toretes, para sistemas contínuos de carbonização. Foi projetado e construído um sistema de secagem de madeira em escala experimental do tipo leito fixo. Utilizou-se amostras de madeira, com casca, em quatro classes diamétricas, (<12 cm, 12,1 – 14, 14,1 – 16 cm e 16,1 – 18 cm), preparadas conforme os tratamentos, a saber: I) Toretos de madeira com comprimento de 40 cm; II) Toretos de madeira com comprimento de 20 cm; III) Toretos de madeira seccionados ao meio no comprimento de 40 cm. Avaliou-se três tempos de residência no reator de secagem (30, 60, 90 min) em temperatura de 300°C, em quatro repetições. A melhor transferência de calor do layout de corte (seccionado ao meio), propiciou maior taxa de secagem e perda de umidade, que por sua vez, impactou a eficiência de secagem.

**Palavras-chave:** Secador leito fixo. Tecnologia de carbonização. Transferência de calor.

## **Drying of wooden logs, at high temperature, aiming for application in continuous charcoal reactors**

**Abstract:** The objective was to provide theoretical support to assist in the development of an industrial dryer, in the form of short wood logs, to be used in continuous carbonization systems. A drying system for wooden logs was designed and built on an experimental scale with a fixed bed type. Wood samples were used, with bark, in four diameter classes (<12 cm, 12.1 – 14 cm, 14.1 – 16 cm and 16.1 – 18 cm), prepared according to the treatments, namely: I) Wooden logs 40 cm long; II) Wooden logs 20 cm long; III) Wooden logs sectioned in half with a length of 40 cm. Three residence times were evaluated in the drying reactor (30, 60, 90 min) at temperature of 300°C, in four replications. The better heat transfer from the cutting layout (sectioned in half) led to a higher drying rate and moisture loss, which in turn impacted drying efficiency.

**Keywords:** Fixed bed dryer. Carbonization technology. Heat transfer.

### **1. INTRODUÇÃO**

O teor de umidade da madeira é uma variável crítica na produção de carvão vegetal. Inadequações em seus valores podem resultar em perdas de produtividade e eficiência do processo de carbonização, aliado a perdas na qualidade do carvão

vegetal e aumento da emissão atmosféricas. Desta forma, a redução e controle do teor de umidade é um dos principais desafios dos empreendimentos florestais do setor, estando presente até mesmo em umas das exigências da Deliberação Normativa 227/COPAM/MG/2018, documento este que estabelece procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal.

A secagem da madeira pode ser realizada de forma natural ou artificial. Embora a secagem natural seja considerada uma forma de redução de umidade de baixo custo e de fácil execução, este método tem algumas desvantagens.

Logo, a secagem artificial da madeira torna-se uma alternativa interessante a ser considerada pelas empresas produtoras de carvão vegetal, uma vez que propicia uma melhor eficiência e controle das variáveis de secagem. De forma incipiente e aplicada em escala experimental ou piloto, na literatura estão disponíveis algumas iniciativas de secagem artificial, voltadas para produção de carvão vegetal, como as desenvolvidas por (Cardoso, 2015) e (Figueiro *et al.*, 2020) utilizando secadores metálicos para secagem da madeira em tora, tendo como fonte de energia os gases combustos da fornalha acoplada aos fornos de carbonização.

Embora tais projetos de secagem artificial da madeira sejam de relevância para o setor de carvão vegetal e contribuam para o conhecimento atual sobre este tema, faz-se necessário o melhor entendimento da secagem em alta temperatura da madeira, em toras, bem como o desenvolvimento de secadores, de forma a elucidar de forma mais abrangente o potencial desta técnica e suas limitações, conforme os estudos realizados por Oliveira *et al.*, (2017) com toretes de madeira secando-os em diferentes temperaturas em estufa com circulação forçada, no entanto em temperaturas não superiores à 150°C. Os autores ressaltam a importância da secagem em temperaturas maiores para reduzir o tempo de residência da madeira no secador e consequentemente aumentar a produtividade em função da alta demanda de matéria-prima para atendimento as unidades produtoras de carvão vegetal.

Deste modo, o objetivo desta pesquisa foi fornecer subsídios teóricos para auxiliar no desenvolvimento de um secador industrial para secagem de madeira, na forma de toretes, para serem utilizados em sistemas contínuos de carbonização.

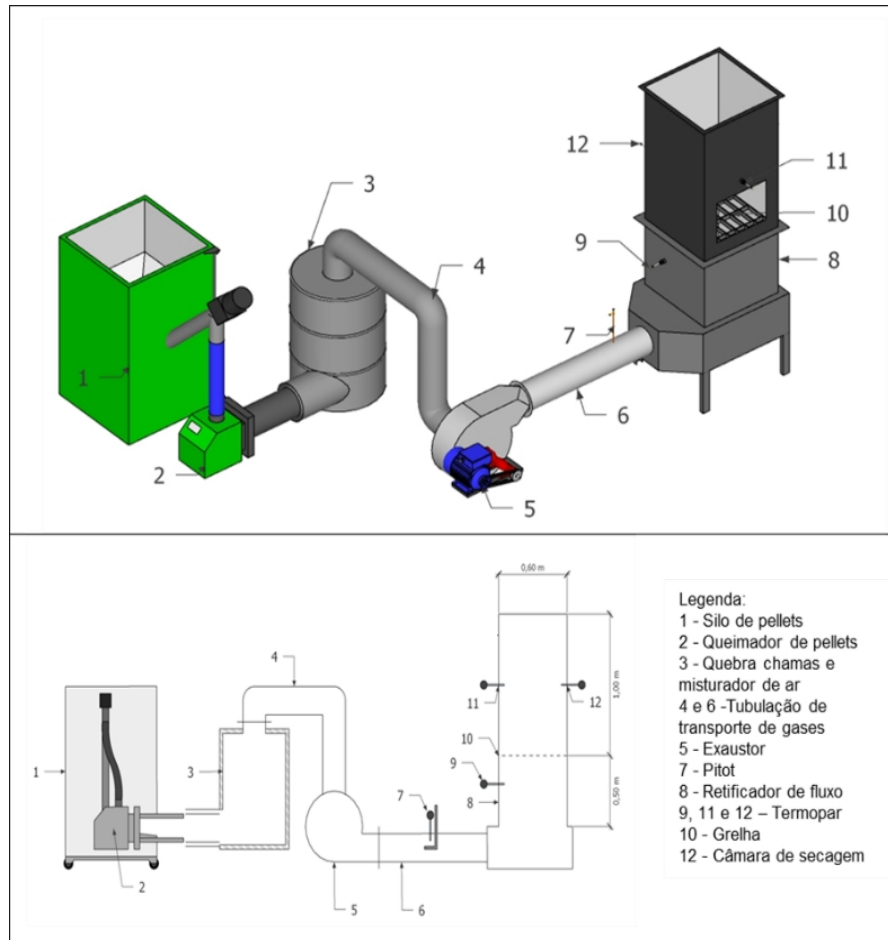
## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas seis árvores de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, provenientes de plantios comerciais com idade de 7 anos e cultivados em espaçamento 3 x 2 cm. Para os estudos de secagem artificial da madeira, em altas temperaturas, utilizou-se amostras de madeira, com casca, em quatro classes diamétricas, (<12 cm, 12,1 – 14, 14,1 – 16 cm e 16,1 – 18 cm) e preparadas conforme os tratamentos, a saber: I) Toretes de madeira com comprimento de 40 cm; II) Toretes de madeira com comprimento de 20 cm; III) Toretes de madeira com comprimento de 40 cm seccionados ao meio, denominados de rachados.

### 2.1 *Desenvolvimento e construção do sistema de secagem artificial*

O sistema de secagem de madeira (Figura 1) foi idealizado e construído com o objetivo de simular as condições de secagem artificial da madeira, em altas temperaturas, de modo, a subsidiar a construção de um secador industrial de toretes.

**Figura 1** - Corte lateral e diagrama do sistema de secagem, respectivamente.



A energia térmica, ou seja, o gás quente necessário para a realização da secagem das madeiras foi gerado a partir de um queimador horizontal de pellets Modelo QP Jet (Lipel) (Item – 1 e 2). Para evitar o contato direto da chama com o exaustor e para auxiliar no controle da temperatura dos gases na saída do queimador de pellets instalou-se um misturador de ar (Item 3).

O transporte dos gases do misturador de ar até a câmara de secagem do secador de toretes foi realizado por meio de tubulações (Itens 4 e 6), com diâmetro interno de 19 cm, revestidas externamente com uma camada de fibra cerâmica.

Os gases provenientes do misturador de fluidos foram succionados por um exaustor centrífugo de rotor aberto, acoplado a um motor de 0,5 cv (Item 5) e conduzidos até uma tubulação, que realizou o transporte dos mesmos até a câmara de secagem. Na tubulação, foi instalado um tubo *pitot* para determinação da vazão de gases injetado na câmara de secagem.

A câmara de secagem foi construída em formato retangular, com chapa de aço carbono, nas dimensões de 1,5 m de altura e 0,6 m de largura, dividida em dois compartimentos, sendo o primeiro localizado na parte inferior da câmara de secagem para retificar o fluxo de gases (Item 8). O segundo compartimento,

localizado na parte superior, da câmara de secagem (Item 12) foi construído com dimensões de 1 m de altura e 0,6 m de largura. Na sua região inferior foi inserida uma grelha (Item 10) para apoio das amostras de madeira e na região frontal foi inserida uma abertura para carregamento e descarregamento da madeira no secador. E na região superior foram colocados dois termopares do tipo K (Itens 11 e 12) para monitoramento da temperatura de saída do gás.

## **2.2      *Secagem artificial da madeira***

Inicialmente, antes da secagem da madeira, parte dos toretes de madeira, com casca, foram selecionados para determinação do teor de umidade inicial, base seca.

Os demais foram utilizados para os estudos de secagem, os quais também foram pesados. Depois da pesagem, procedeu o carregamento dos toretes de madeira para dentro da câmara de secagem, posicionada no sentido horizontal, formando duas camadas de madeira uma sobre a outra. Após o carregamento da madeira, realizou-se o fechamento da porta da câmara de secagem e iniciou-se o processo de secagem, por meio da ignição no queimador de pellets e acionamento do ventilador.

A secagem da madeira foi realizada em três estágios. O primeiro estágio consistiu no aquecimento da câmara de secagem até a temperatura de 200°C por dez minutos. No segundo estágio, aumentou-se a temperatura da câmara de secagem até 300°C, sendo a taxa de secagem variável de acordo com o tempo de residência avaliado. Para as secagens realizadas com os tempos de residência de 30 e 60 minutos, foi efetuado um acréscimo na temperatura de 50°C a cada 20 min. Para as secagens realizadas com tempo de 90 min, houve um acréscimo de temperatura de 50°C a cada 30 minutos. Por fim, o terceiro estágio foi o resfriamento.

O monitoramento e coleta de informações referentes às vazões de gases e temperaturas de todo o sistema de secagem foram realizados a cada dez minutos de secagem. Determinou-se a taxa de secagem média e a eficiência de secagem, para cada tratamento.

## 2.3 Análise de dados

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial triplo (3 x 4 x 3), para avaliação do efeito do layout de corte da madeira (40 cm de comprimento, 20 cm de comprimento e seccionada ao meio), classe de diâmetro (<12 cm, 12,1 – 14, 14,1 – 16 cm e 16,1 – 18 cm) e tempo de residência da madeira na câmara de secagem (30, 60, 90 min). Foram realizadas quatro repetições. Para explicar o efeito das variáveis na perda total de umidade e taxa de secagem, foram ajustados modelos de regressão. Os dados de eficiência energética foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de Tukey a 5% de significância. O software de análise estatística R (R Core Team, 2017) foi utilizado para a execução das análises estatísticas.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Perda de umidade da madeira e taxa de secagem

As equações ajustadas referentes aos modelos que melhor explicaram perda de umidade dos toretes e eficiência de secagem, em função do diâmetro da madeira e tempo de residência de secagem, para os layouts de corte analisados apresentaram satisfatórios erro padrão residual ( $S_{y,x}$ ) e coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) e estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Estimativas dos parâmetros e medidas de precisão da equação ajustada

Layout de corte	Perda de umidade (%) = $\beta_1 + \beta_2(\ln(D)) + \beta_3^*(\ln(T)) + \beta_4(\ln(D*T))$					
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$R^2$	$S_{y,x}$
40 cm	-314,66**	95.22**	112.52**	-34.19**	97.25	1.63
20 cm	-129.66**	31.61**	53.37**	-14.13**	98.16	1.15
Seccionada ao meio (Rachada)	-262.57**	74.3**	107.46**	-31.13**	96.74	2.11
Layout de corte	Taxa de secagem (%) = $\beta_1 + \beta_2(\ln(D)) + \beta_3^*(\ln(T))$					
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$R^2$	$S_{y,x}$
40 cm	1.41**	-0.44**	0.01 <sup>(ns)</sup>	-	90.43	0.29



20 cm	2.09**	-0.72**	0.06**	-	94.11	0.39
Seccionada ao meio (Rachada)	3.32**	-0.96**	-0.03*	-	91.23	0.20

Legenda: D = diâmetro dos toretes (cm); T = tempo de secagem (min); \*\* = p-value < 0.001; \* = p-value < 0.05; (ns) = não significativo.

Os maiores tempos de residência, independente do layout de corte e diâmetro do torete, resultaram em maior perda de umidade. O aumento do tempo de residência da madeira no secador implica em maior tempo de exposição a fonte de calor, que propiciará maior aquecimento da madeira, que por sua vez, implica no aumento da possibilidade de um maior número de moléculas de água adquirirem energia suficiente para sua evaporação. Para os valores de taxa de secagem, nos toretes de 40 cm de comprimento, ao contrário dos demais layouts de corte, não foi observado o efeito do tempo de residência. A temperatura interna da madeira exerce expressiva função na dinâmica de translocação de água e consequentemente na taxa de secagem da madeira.

Os menores diâmetros tiveram maiores perdas de umidade e taxas de secagem, independente do layout de corte. Toretos de maiores diâmetros, apresentam um alongamento da distância a ser percorrido pela água no sentido axial, em comparação aqueles de menores diâmetro e comprimento (Byrne *et al.*, 1997). A perda de água da madeira no seu sentido longitudinal é maior em relação ao radial e tangencial, uma vez que a permeabilidade e condutividade térmica são superiores neste sentido.

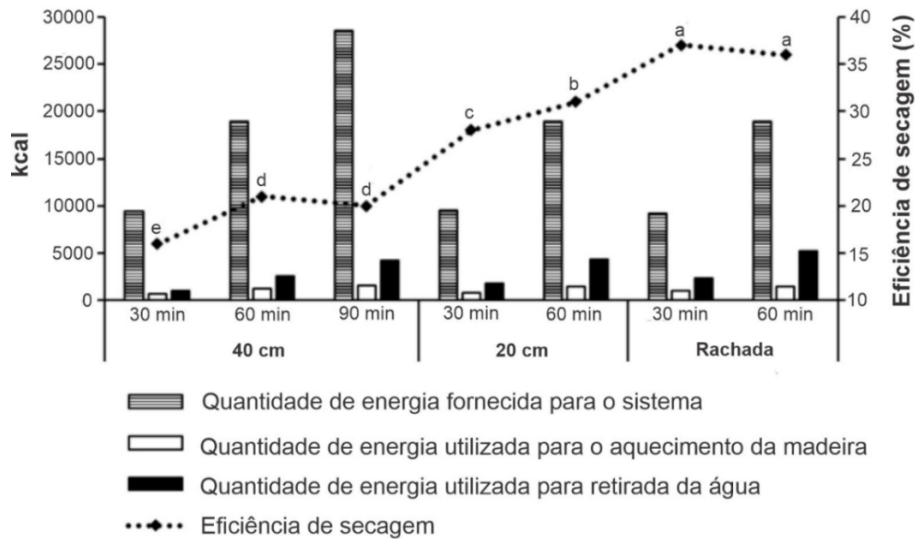
Entre os layouts de cortes, a madeira seccionada ao meio (rachada) apresentou as maiores perdas de umidade relativa e taxas de aquecimentos, com valores 50% superiores, aproximadamente, quando comparados a madeira de 40 cm de comprimento. A maior área de superfície em contato com o gás e exposição da região do cerne da madeira potencializaram a transferência térmica e por consequência o aquecimento na madeira, em comparação aos demais layouts de corte. Neste sentido, há uma maior disponibilidade de energia para vaporização da água na madeira, o que resulta em uma maior taxa de secagem e perda de umidade.



### 3.1 Eficiência da secagem

Na Figura 2 são apresentados os valores médios de eficiência de secagem da madeira em função dos tratamentos.

**Figura 2** - Eficiência de secagem, de acordo com os layouts de corte, em função do tempo de residência de secagem



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Os toretes seccionados ao meio (rachados) apresentaram a melhor eficiência energética de secagem, em relação aos demais layouts de corte (Figura 2). A maior área de contato da madeira com a fonte de calor no torete seccionado ao meio (rachado) propiciou seu melhor aquecimento, e conseqüentemente resultou em uma maior taxa de secagem e perda de umidade, garantindo, portanto, uma elevada eficiência energética da secagem, em comparação aos toretes de 20 e 40 cm de comprimento, independente da classe de diâmetro.

#### 4. CONCLUSÃO

Em todos os tratamentos avaliados ocorreu a formação de um gradiente de umidade no sentido medula/casca dos toretes de madeira após a secagem.

Os toretes de madeira, centro de classe diamétrica de 12 cm, seccionada ao meio (denominada de rachada), submetidos a um tempo de residência de secagem de 60 minutos, foram os que tiveram maior eficiência de secagem.

O secador protótipo de leito fixo é eficiente para secagem em altas temperaturas, independente do layout de corte da madeira, fornecendo subsídios



para o desenvolvimento e dimensionamento para secadores industriais, principalmente voltados para a utilização em retortas contínuas de carbonização.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, FAPEMIG, CNPq (Bolsa produtividade/processo número 308328/2021-3). EMBRAPIL e a Sociedade de Investigações Florestais (SIF), pela oferta de recursos.

## 6. REFERÊNCIAS

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

CARDOSO, Marco Túlio. **Secagem de toras para produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases de carbonização**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

COPAM – CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – MG. **Deliberação Normativa COPAM nº 227**, de 29 de Agosto de 2018.

FIGUEIRO, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; RIBEIRO, G. B. D. Wood dryers: a sustainable alternative for increased charcoal production. **Revista Floresta**, v.50, n.1, p.943-952, 2020.

OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A.C.O.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRÓ, C. G.; VITAL, B.R.; MAGALHÃES, M.A. *Eucalyptus* logs drying at high temperatures. **Revista Arvore**, v.41, n.2. p.1-9, 2017.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2017.