

HUMBERTO FAULLER DE SIQUEIRA

**APROVEITAMENTO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO PARA SECAGEM
DA MADEIRA E PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Angélica de Cássia O. Carneiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S618a Siqueira, Humberto Fauller de, 1992-
2021 Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da
madeira e produção de carvão vegetal / Humberto Fauller de
Siqueira. – Viçosa, MG, 2021.
116 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Madeira como combustível. 2. Pirólise. 3. Madeira
serrada - Secagem. 4. Madeira - Efeitos da umidade.
5. Produtividade. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.98673

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB6 2523

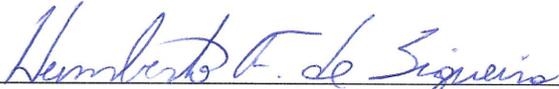
HUMBERTO FAULLER DE SIQUEIRA

**APROVEITAMENTO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO PARA SECAGEM
DA MADEIRA E PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 16 de abril de 2021

Assentimento:



Humberto Fauller de Siqueira
Autor



Angélica de Cassia Oliveira Carneiro
Orientadora

Aos meus queridos pais Valter e Cilêda
Ao meu amado filho Pedro Lucas
À minha irmã Anna Laura
Às minhas avós Alayde e Maria das Neves
Aos meus tios

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e por não me deixar desistir diante dos desafios e dificuldades durante esta caminhada.

À minha família por sempre acreditar em meu propósito e me incentivar a alcançar meus objetivos. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nesta caminhada. Pedro Lucas, meu filho, você é a razão pela qual dedico todo meu tempo e me incentiva a ser uma pessoa melhor. Minha irmã Anna Laura e avós Dona Téia e Dona Neves, vocês foram minha fonte de amor e carinho.

À minha orientadora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, seus ensinamentos foram fundamentais para meu desenvolvimento profissional e pessoal, sua amizade e companheirismo me acolheu nos momentos mais difíceis durante esta caminhada.

Aos meus amigos nazariense, que mesmo estando distante não deixamos de nos relacionar, que todo este tempo serviu para demonstrar o quão próximo estamos e que amigos de verdade são para vida toda.

Aos meus amigos de república por nos mantermos unidos e sempre procurando ajudarmos uns aos outros, em especial, Bruno Leão Said Schettini.

Aos demais professores Benedito Rocha Vital, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, Vinícius Rezende de Castro e Marcos Oliveira de Paula pelos ensinamentos, oportunidades e pela confiança durante todos esses anos.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pela oportunidade de cursar o doutorado e por tudo que foi proporcionado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço também ao CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, em especial, Sálvio Rodrigues Teixeira, Eder Cabral de Sousa, Bráulio e Francisco Ricardo Bezerra pela disponibilidade a ajuda durante a realização de todo meu experimento.

Aos meus colegas do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, em especial, Camila Lopes, Leonardo Nunes, Laura Lima, Amanda Carvalho, Dandara Guimarães, Paulo, Felipe,

Evanderson, Letícia, Lucas, Clarissa, Carlos Miguel e todos que contribuíram, obrigado pela disponibilidade e ajuda nas coletas e realização do experimento.

Agradeço também à empresa ArcelorMittal pelo financiamento deste projeto. Por fim, agradeço a todos que de forma direta e indireta contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

RESUMO

SIQUEIRA, Humberto Fauller, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2021. **Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira e produção de carvão vegetal.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

O carvão vegetal é um produto florestal renovável de grande importância para o Brasil, único país consumidor deste produto na siderurgia e metalurgia. Visando aumentar a sustentabilidade na produção deste insumo, os gases gerados na carbonização não são aproveitados e apresentam potencial energético, os quais podem ser queimados em fornalhas específicas, mitigando as emissões do processo e produzindo energia com potencial para geração elétrica e/ou térmica. Neste sentido, esse estudo objetivou o desenvolvimento e avaliação de um sistema de aproveitamento energético dos gases, em primeira etapa, da carbonização e, em segunda etapa, os gases combustos do queimador para secagem artificial da madeira dentro do próprio forno e avaliar a eficiência da secagem e os impactos no rendimento e qualidade do carvão vegetal. O sistema é composto por quatro fornos circulares de alvenaria, acoplados a um queimador central, interligados por meio de dutos. Na primeira etapa utilizaram-se apenas dois fornos, nos quais os gases da carbonização foram extraídos da chaminé do forno em carbonização e direcionados ao forno de secagem, carregado de madeira. Após as avaliações, prosseguiu-se para a segunda etapa, modificando o sistema e utilizando os quatro fornos, dois para carbonização e dois para secagem. Na chaminé do queimador foi instalada uma tubulação metálica para extração dos gases combustos e direcionamento para os fornos de secagem. Foram avaliadas as temperaturas de 120 e 150 °C e os tempos de 15; 22,5; 30; 45 e 60 horas. A redução da umidade foi medida a partir da pesagem da madeira antes e após cada experimentação. Após a secagem, coleta e análises dos resultados, foram definidos os melhores tempos e temperatura para avaliar o efeito da secagem artificial da madeira seguida de carbonização, de modo a obter os ganhos em rendimento e avaliar os impactos nas propriedades do carvão vegetal. Conclui-se que o uso dos gases da carbonização é eficiente na secagem apenas quando utilizado na 3ª fase da carbonização. No entanto, a secagem artificial da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos foi mais eficaz, e as maiores perdas de umidade ocorreram quando utilizados os gases combustos a 150 °C durante 30 horas, o que promoveu, também, ganhos em rendimento gravimétrico e qualidade do carvão vegetal.

Palavras – chave: Energia da madeira. Pirólise lenta. Secagem em toras. Umidade da madeira. Rendimento gravimétrico.

ABSTRACT

SIQUEIRA, Humberto Fauller, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2021. **Use of carbonization gases to drying wood and charcoal production.** Adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Charcoal is a renewable forest product of great importance for Brazil, the only country that consumes this product in steel and metallurgy. In order to increase sustainability in the production of charcoal, the gases generated in carbonization have energy potential and can be burned in specific furnaces, mitigating the needs of the process and producing energy with potential for electrical and / or thermal generation. In this sense, this study aimed at the development and evaluation of a system of energetic use of gases, in the first stage, of carbonization and, in the second stage, the combustion gases of the burner for artificial drying of the wood inside the oven itself and to evaluate the efficiency of the drying and impacts on charcoal yield and quality. The system consists of four circular masonry ovens, coupled to a central burner, interconnected by means of ducts. In the first stage, only two furnaces were used, where the carbonization gases were extracted from the chimney of the carbonization oven and directed to the drying oven, loaded with wood. After the evaluations, a second step was continued, modifying the system and using the four ovens, two for carbonization and two for drying. In the chimney of the burner, a metal pipe was installed to extract the combusted gases and direct them to the drying ovens. Two temperatures (120 and 150 ° C) and five times (15; 22.5; 30; 45 and 60 hours) were evaluated. The reduction in moisture content was measured by weighing the wood before and after each treatment. After drying, collecting and analyzing the results, the best times and temperatures were defined and the effect of artificial drying of wood followed by carbonization was defined, in order to obtain gains in yield and evaluate the impacts on the properties of charcoal. It is concluded that the use of carbonization gases is efficient in drying only when used in the 3rd phase, however, the artificial drying of the wood inside the furnace using the combustion gases more efficiently and as greater losses of moisture it was using the combustion gases at 150 ° C for 30 hours, which also promoted gains in gravimetric yield, without affecting the quality of charcoal.

Keywords: Wood energy. Slow pyrolysis. Logs drying. Wood moisture. Gravimetric Yield.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
RESUMO	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO I - ASPECTOS TÉCNICOS DA SECAGEM DA MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL NO BRASIL	
1.INTRODUÇÃO	15
2. CONTEXTO ENERGÉTICO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL NO BRASIL	16
3. TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.....	18
4. SECAGEM DA MADEIRA	20
4.1. Fatores que afetam a secagem da madeira.....	23
4.2. Secagem natural da madeira	27
4.3. Secagem artificial da madeira.....	28
4.4. Aspectos econômicos	30
5. MATRIZ SWOT – SECAGEM NATURAL x SECAGEM ARTIFICIAL	32
6. CONCLUSÕES	34
7. AGRADECIMENTOS.....	34
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
RESUMO	40
ABSTRACT	41
CAPÍTULO II - APROVEITAMENTO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO PARA SECAGEM DA MADEIRA DENTRO DE FORNOS CIRCULARES DE ALVENARIA	
1. INTRODUÇÃO	42
2. OBJETIVOS	43
2.1. Objetivo principal.....	43
2.2. Objetivos específicos.....	43
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.1. Obtenção e caracterização da madeira.....	44
3.2. Construção do Sistema Fornos-Fornalha.....	46
3.3. Descrição do sistema de transporte dos gases para realização da secagem.....	49
3.4. Carbonização da madeira.....	54
3.5. Perfil térmico do sistema de secagem.....	55
3.6. Secagem artificial da madeira dentro do forno.....	55
3.7. Eficiência e taxa de secagem da madeira dentro do forno	58
3.8. Delineamento experimental.....	59
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61

3.1. Propriedades da madeira.....	61
3.2. Perfil térmico do processo de secagem da madeira dentro do forno	62
3.3. Eficiência da secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases da carbonização – 1ª Etapa	70
3.4. Eficiência da secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador – 2ª Etapa	72
4. CONCLUSÕES	82
5. AGRADECIMENTOS.....	82
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
RESUMO	86
ABSTRACT	87
CAPÍTULO III - AUMENTO DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO POR MEIO DA SECAGEM DA MADEIRA DENTRO DO FORNO UTILIZANDO OS GASES COMBUSTOS DO QUEIMADOR	
1. INTRODUÇÃO	88
2. OBJETIVOS	89
2.1. Objetivo principal	89
2.2. Objetivos específicos	89
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	89
3.1. Obtenção e caracterização da matéria prima	89
3.2. Descrição do sistema fornos-fornalha e o sistema de transporte de gases	90
3.3. Secagem dentro do forno e posterior carbonização da madeira	93
3.4. Perfil térmico do forno de carbonização e do forno de secagem.....	97
3.5. Cálculos do rendimento gravimétrico	97
3.6. Amostragem e propriedades do carvão vegetal	98
3.7. Delineamento experimental	99
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
4.1. Propriedades da madeira.....	99
4.2. Parâmetros do processo de secagem da madeira dentro do forno e carbonização	100
4.3. Rendimentos gravimétrico em produtos	105
4.4. Propriedades do carvão vegetal	109
5. CONCLUSÕES	111
6. AGRADECIMENTOS.....	112
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
CONCLUSÕES GERAIS.....	116

INTRODUÇÃO GERAL

A carbonização da madeira é realizada há séculos. Nas últimas décadas, os avanços tecnológicos desta atividade são a peça chave para a evolução e desenvolvimento de cada etapa envolvida na obtenção do produto final: o carvão vegetal. Até que ocorra a degradação térmica da madeira para produção deste importante insumo energético, algumas etapas precedentes a estas se destacam como um dos principais gargalos envolvidos nesta atividade.

A secagem da madeira é um entrave em sua utilização, principalmente para produção de carvão vegetal. A ausência de controle da secagem e, conseqüentemente, carbonização de madeiras com elevados teores de umidade resultam em decréscimo da produtividade dos fornos de alvenaria e metálicos, redução da eficiência energética da conversão, diminuição das propriedades mecânicas do biorredutor produzido e aumento das emissões de gases durante a decomposição térmica da madeira. Comumente a secagem é realizada de forma natural, secagem ao ar livre, devido ao menor custo envolvido, no entanto, demanda longos períodos de tempo (> 120 dias) para que atinja a umidade próxima ao recomendado para carbonização (~30%) (ZANUNCIO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2017) sendo ideal carbonizar madeiras com menores teores de água possível.

Por outro lado, diversos estudos e equipamentos, já foram desenvolvidos para a secagem da madeira, no entanto, a grande maioria tem sido destinada a madeiras serradas. Os secadores convencionais, desumidificadores e secadores a vácuo são relatados por JANKOWSKY (1995) e já consolidados tecnologicamente. Além desses, estufas solares (STANGERLIN et al., 2012), equipamentos que emitem micro-ondas e túneis de secagem contínua (GARAIS e BORTOLI, 2019), são alternativas desenvolvidas e avaliadas, usualmente aplicadas no meio industrial para tal finalidade.

Para fins de carbonização, poucos estudos foram desenvolvidos para secagem artificial da madeira em toras, sendo relatadas pela literatura pesquisas desenvolvidas a partir do aproveitamento dos gases da própria carbonização. Fávero et al. (2007), desenvolveram um equipamento móvel para recuperação do licor pirolenhoso da carbonização e posterior queima para secagem da madeira dentro do forno. Já Figueiró et al. (2018), avaliaram a secagem da madeira por meio de secador metálico, aproveitando os gases da carbonização. Por outro lado, Cardoso (2015) avaliou a secagem artificial da madeira num secador metálico, utilizando os gases combustos da carbonização.

Diante da importância destes estudos e tecnologias para solucionar os entraves envolvidos na secagem da madeira e produção do carvão vegetal, há que se destacar que os aspectos econômicos inviabilizam a aplicação industrial. Em virtude do elevado investimento inicial em infraestrutura, robustez de equipamentos frente à degradação dos produtos da carbonização, maior movimentação da carga de madeira e elevado consumo elétrico, a implementação destas tecnologias acaba por ser dificultada.

Uma alternativa mostra-se interessante para esta finalidade, sendo ela a secagem artificial da madeira dentro do próprio forno de carbonização, utilizando os gases da carbonização, ou os gases combustos do queimador. No entanto, faz-se necessário conhecer o efeito do uso dos gases da carbonização em função de cada fase da carbonização, ou quais tempos e temperaturas são mais eficientes na secagem artificial da madeira dentro do forno; além dos impactos no rendimento e qualidade do carvão vegetal.

Diante do exposto, o objetivo principal desta pesquisa consistiu em desenvolver um sistema de secagem da madeira em uma planta piloto do sistema fornos-fornalha utilizando, em primeira etapa, os gases da carbonização e, em segunda etapa, os gases combustos do queimador para secagem da madeira em tora dentro do forno. Os objetivos específicos foram: obter o perfil térmico do sistema de transporte dos gases da carbonização e gases combustos do queimador até o forno utilizado para secagem da madeira; obter o perfil térmico do forno de secagem da madeira; determinar, em primeira etapa, qual a fase da carbonização e, em segunda etapa, qual melhor tempo e temperatura de secagem da madeira dentro do forno; avaliar a massa de água eliminada durante cada procedimento operacional de secagem da madeira em função da carga total de madeira, posição da tora dentro do forno e ao longo da tora; determinar a perda de umidade e taxa de secagem da madeira dentro do forno e; avaliar o efeito tempo x temperatura de secagem da madeira no rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal.

De acordo com os objetivos propostos, a pesquisa foi estruturada em três capítulos, conforme apresentado a seguir:

- Capítulo I: Referencial teórico – “Aspectos técnicos da secagem da madeira para produção de carvão vegetal no Brasil”;
- Capítulo II: “Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira dentro de fornos circulares de alvenaria”;
- Capítulo III: “Aumento do rendimento gravimétrico em carvão vegetal por meio da secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARDOSO, M. T.; **Secagem de toras para produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases da carbonização**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). 2015. 74p. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; 2015.

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental – MG. **Deliberação Normativa COPAM nº 227, de 29 de Agosto de 2018**. Disponível em: < http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/REGULARIZACAO/TRs/Termo_de_Refer%C3%Aancia_para_cumprimento_da_DN_COPAM_N_227_2018_quanto_%C3%A0_performance_da_produ%C3%A7%C3%A3o_de_carv%C3%A3o_vegetal_proveniente_de_floresta_plantada.docx > Acesso em: 25 de maio de 2019.

FÁVERO, G. C.; VALLE, R. M.; DUARTE, T. M.; Análise térmica de um sistema de combustão de alcatrão em fornos retangulares para secagem da madeira. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA. **Anais**. Cusco – Peru, 8p. 2007.

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

GARAI, E. S.; BORTOLI, S.; Análise do custo de secagem de madeira: um comparativo entre estufas terceirizadas e em túnel de secagem próprio. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Anais**. Ponta Grossa – PR, 2019.

JANKOWSKY, I. P.; Equipamentos e processos para secagem de madeiras. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA. **Anais**. Piracicaba - SP: IPEF/IPT, 1995. 109-118p.

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 temperature. **Revista Árvore**, Viçosa, v 41, n. 2, p.1-9, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000200007>

STANGERLIN, D. M.; MELO, R. R.; SANTINI, E. J.; CORDEIRO, S. A.; Comparação econômica entre os métodos de secagem de madeira ao ar livre e em estufa solar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, suplemento, p.850-856, 2012. <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v7isa1986>>.

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; CARVALHO, A. G.; TRUGILHO, P. F.; Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestalis**, Piracicaba – SP, v.41, n.99, p. 353-360, 2013.

RESUMO

SIQUEIRA, Humberto Fauller, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2021. **Aspectos técnicos da secagem da madeira para produção de carvão vegetal no Brasil.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

A biomassa florestal tem apresentado cada vez mais participação na cadeia produtiva de diversos produtos. Dentre os vários métodos de industrialização da madeira, destaca-se a carbonização, que tem como objetivo principal a produção de carvão vegetal. Tal processo é dividido em várias etapas, desde o campo até a indústria, e tem como um dos seus principais gargalos a secagem da madeira em campo, devido ao longo período demandado para que esta atinja teores de umidades inferiores a 40%, conforme exigido na Deliberação Normativa 227 (COPAM/MG, 2018). Atualmente, a secagem ao ar livre é a prática mais aplicada devido ao baixo custo, no entanto, a madeira permanece no campo, muitas vezes, por mais de 150 dias, dependendo da região. Vale salientar que a secagem da madeira se faz necessária para aumentar o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal. Neste contexto, a secagem artificial é uma alternativa para redução do tempo de estocagem da madeira em campo, tendo como consequência o aumento da eficiência do processo de carbonização. A secagem pode ser realizada de duas formas, em estufas ou secadores, ou dentro do próprio forno de carbonização. Alguns estudos utilizando secadores metálicos já foram desenvolvidos e se mostraram viáveis tecnicamente, no entanto, os altos custos de implantação e energia elétrica, bem como a movimentação da madeira, fizeram com que esses projetos fossem inviáveis economicamente. Assim, a secagem dentro do próprio forno de carbonização pode ser uma alternativa para redução de custos de investimentos e operacionais. A secagem dentro do próprio forno pode ser realizada utilizando os gases da carbonização e os gases combustos do queimador de gases, os quais têm maior potencial térmico em relação aos gases da carbonização. No entanto, apesar destas possibilidades técnicas de secagem da madeira dentro do próprio forno tenham se mostrado interessantes, as mesmas ainda não foram validadas, sendo necessário o desenvolvimento de estudos que possam identificar melhores tempos e temperaturas de secagem, bem como o local de injeção do gás para dentro do forno, de modo a maximizar o ciclo produtivo, a logística de transporte de madeira, além do rendimento e qualidade do carvão vegetal.

Palavras – chave: Carbonização. Umidade da madeira. Secagem em toras.

ABSTRACT

SIQUEIRA, Humberto Fauller, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2021. **Technical aspects of drying wood for charcoal production in brazil.** Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Forest biomass has been increasingly participating in the production chain of various products. Among the various methods of industrializing wood, carbonization stands out, whose main objective is the production of charcoal. This production is divided into several stages, from the field to the industry, and has as one of its main bottlenecks, the drying of the wood in the field, due to the long period that requires it to reach moisture content below 40%, as required in Normative Resolution 227 (COPAM/MG, 2018). Currently, outdoor drying is the most applied practice due to its low cost, however, the wood remains in the field, often for more than 150 days, depending on the region. It is worth noting that drying the wood is necessary to increase the gravimetric yield and the quality of charcoal. In this context, artificial drying is an alternative to reduce the storage time of wood in the field, with the consequence of increasing the efficiency of the carbonization process. Drying can be done in two ways, in greenhouses or dryers, or inside the carbonization oven itself. Some studies using metallic dryers have already been developed and proved to be technically feasible, however, the high costs of implantation and electricity, as well as the movement of wood made these projects economically unfeasible. Thus, drying inside the carbonization oven itself can be an alternative to reduce investment and operating costs. Drying inside the oven can be carried out either directly using the carbonization gases, or using the combustion gases from the gas burner, which have greater thermal potential in relation to the carbonization gases. However, in spite of these technical possibilities of drying the wood inside the oven itself proving to be interesting, they have not yet been validated, having to study the best drying times and temperatures, as well as the gas injection site inside the kiln, in order to maximize the production cycle, the logistics of transporting wood, in addition to the yield and quality of charcoal.

Keywords: Carbonization. Wood moisture. Drying logs.

CAPÍTULO I

ASPECTOS TÉCNICOS DA SECAGEM DA MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL NO BRASIL

1. INTRODUÇÃO

O uso da biomassa florestal tem aumentado consideravelmente devido à demanda mundial por energia renovável e, também, pelo aprimoramento dos diversos processos que envolvem a industrialização da madeira. No setor energético, destacam-se as várias possibilidades de uso da madeira, como a queima direta, gaseificação, densificação e carbonização.

Diante destas possibilidades de destinação da madeira, um fator em comum que impacta diretamente sua aplicação é o teor de água ou umidade. Todo material lenhoso recém-colhido tem considerável quantidade de água que, para determinado uso, deve ser, em parte, removida. Assim, logo após a colheita da árvore, inicia-se a retirada natural da água da madeira e, com o passar do tempo, a taxa de secagem é reduzida, necessitando de meios artificiais para redução da umidade até o teor final desejado, principalmente, quando se almeja reduzir o tempo de secagem da madeira em campo.

De modo geral, o uso da madeira para produção de carvão vegetal deve ter teor de umidade, base seca, inferior a 40%; conforme especificado na Deliberação Normativa 227, do estado de Minas Gerais, que trata da performance da produção de carvão vegetal proveniente de floresta plantada (COPAM, 2018). Essa exigência vem ao encontro às boas práticas para produção sustentável de carvão vegetal, pois quanto menor o teor de umidade da madeira, maior será o rendimento gravimétrico, menor geração de finos, maior produtividade dos fornos e, conseqüentemente, menor emissão de poluentes.

Neste sentido, cada vez mais têm se intensificado os estudos sobre a relação água-madeira e secagem da madeira em tora. Há décadas pesquisadores têm procurado compreender as curvas de secagem da madeira em toras, conforme estudos de Vital et al., (1985), subsidiando estudos sobre metodologias de secagem. Atualmente, dentre as metodologias utilizadas, destacam-se a de forma natural, em campo, principal método empregado; ou utilizando os gases do próprio processo de carbonização da madeira para a realização da secagem artificial (FÁVERO et al., 2007; CARDOSO, 2015; FIGUEIRÓ et al., 2018).

A secagem natural é de baixo custo de implantação e operação, porém é dependente de fatores climáticos e do arranjo das pilhas de madeira estocadas. Dessa forma, o tempo de secagem da tora é longo, e a madeira pode permanecer no campo, muitas vezes, por mais de 150 dias, dependendo da região (OLIVEIRA et al., 2017), podendo, em alguns casos, ocorrer, inclusive, perdas significativas de qualidade desta por apodrecimento, além da estagnação do capital investido, dentre outros.

Por outro lado, a secagem artificial necessita de secadores ou estufas para o acondicionamento da madeira, tendo como consequência maior movimentação da carga de madeira, além de demandar instalação de exaustores e ventiladores para realizar a circulação do ar e retirada da umidade do ambiente. Logo, os custos com investimento em infraestrutura, logística e consumo de energia elétrica têm inviabilizado a aplicação industrial desta tecnologia (CARDOSO, 2015).

Com isso, a secagem dentro do próprio forno de carbonização torna-se uma alternativa para redução de custos de investimentos e operacionais. Essa pode ser realizada tanto utilizando, diretamente, os gases da carbonização, quanto utilizando os gases combustos do queimador de gases, os quais têm maior potencial térmico em relação aos gases da carbonização.

Apesar destas possibilidades técnicas de secagem da madeira dentro do próprio forno se mostrar interessante, as mesmas não foram validadas, ressaltando a necessidade de estudar os melhores tempos e temperaturas de secagem, bem como o local de injeção do gás dentro do forno, de modo a maximizar o ciclo produtivo, a logística de transporte de madeira, além do rendimento e qualidade do carvão vegetal.

Deste modo, visando fornecer subsídios para os estudos de secagem artificial da madeira em tora para produção de carvão vegetal, essa revisão foi elaborada contemplando as tecnologias desenvolvidas para produção sustentável de carvão vegetal, bem como os fatores que afetam a secagem da madeira.

2. CONTEXTO ENERGÉTICO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL NO BRASIL

O Brasil se destaca como referência mundial no setor de florestas plantadas em virtude da sustentabilidade, competitividade e inovação tanto no setor produtivo, quanto no beneficiamento da madeira para geração de produtos de qualidade. O setor tem investido na

transformação de subprodutos e resíduos de processos industriais em novos produtos renováveis, fortalecendo o desenvolvimento ambiental, social e uma economia de baixo carbono.

O Brasil possui 9,0 milhões de hectares de reflorestamento, os quais são responsáveis por 91% de toda madeira produzida para fins industriais, colaborando com 1,2% do produto interno bruto do país, além de ser um dos segmentos com maior potencial de contribuição para o desenvolvimento de uma “economia verde” (IBÁ, 2020). Destes 9,0 milhões de hectares, 12% são destinados ao segmento de siderurgia a carvão vegetal, formados por áreas totalmente reflorestadas com espécies, clones e híbridos do gênero *Eucalyptus* sp. Os plantios de eucalipto ocupam 6,97 milhões de hectares da área de florestas plantadas e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (27,5%), devido à vocação siderúrgica do estado (IBÁ, 2020). Devido à boa adaptação do gênero no país e inovações tecnológicas para o desenvolvimento da cultura, em 2019, o Brasil liderou o ranking global de produtividade florestal, com uma média de 35,3 m³/ha.ano.

O consumo de carvão vegetal no Brasil em 2019 foi de 5,1 milhões de toneladas e o setor segue em desenvolvimento para promover o crescimento contínuo da atividade florestal (IBÁ, 2020). Atualmente, a maioria das 180 indústrias siderúrgicas e metalúrgicas utiliza o carvão vegetal para a produção de ferro-gusa, de ferro-ligas e de aço no Brasil. No estado de Minas Gerais, maior consumidor de carvão vegetal, devido às usinas siderúrgicas, foi registrado em 2019 o aumento de 7,96% no consumo de carvão vegetal, totalizando 11,2 milhões de metros de carvão vegetal (SINDIFER, 2020).

O Brasil produziu, no ano de 2019, aproximadamente, 30,9 milhões de toneladas de ferro gusa, sendo 22,5% desta produção utilizando o carvão vegetal como biorredutor (SINDIFER, 2020). As usinas integradas, produtoras de ferro-gusa e aço, produziram, em média, 2,33 milhões de toneladas de ferro-gusa utilizando o carvão vegetal como biorredutor do minério de ferro, no entanto, as usinas independentes são as maiores consumidoras, produzindo 4,62 milhões de toneladas de ferro-gusa a carvão vegetal.

A produção de aço no Brasil, em 2019, foi de 32,6 milhões de toneladas, tendo essa indústria um consumo médio de 1,72 milhões de toneladas de carvão vegetal (IABR, 2020). Isto representa, ainda, baixo consumo quando comparado às fontes não renováveis utilizadas para este fim. Neste sentido, visto a importância do carvão vegetal, ações devem ser tomadas para torná-lo competitivo, principalmente no que diz respeito ao setor siderúrgico.

Devido às mudanças climáticas e acordos firmados na Conferência das Partes 21 (COP 21), além do desenvolvimento de uma economia verde e sustentável, é fundamental o uso de fontes renováveis na produção de bens de consumo, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa e o uso de fontes não renováveis. O Brasil tem potencial de produção florestal, no entanto necessita desenvolver tecnologias de produção voltadas à redução de custos, além do estabelecimento de políticas claras e consolidadas para o setor florestal e, em específico, o setor de carvão vegetal, para que consiga apresentar competitividade frente às demais fontes de insumo (IBÁ, 2020).

3. TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

A necessidade de melhoria do processo de produção de carvão vegetal é antiga. Brito (1990) reafirmava, já naquela época, a necessidade de modificação das técnicas empíricas e subjetivas neste setor por processos produtivos mais tecnificados e padronizados, com o objetivo de maximizar o rendimento e qualidade do carvão vegetal. O cenário em questão tem apresentado mudanças por meio do desenvolvimento de sistemas de produção mais sustentáveis, com controles de processo mais rigorosos, melhores condições de trabalho e, por consequência, maior eficiência e produtividade.

A evolução nos fornos para produção de carvão vegetal ocorreu juntamente com melhor controle do processo de carbonização, excluindo a subjetividade do operador do forno. A instrumentalização do processo foi um dos primeiros avanços na carbonização, por meio do uso de sensores infravermelho (pirômetro) e termopares. Em estudos desenvolvidos por Raad (2001), Carvalho et al. (2012) e Costa (2012) foram observadas melhorias do controle do processo de carbonização por meio do aumento do rendimento gravimétrico utilizando a técnica de pirometria.

No setor privado, empresas como Vallourec passaram a ser totalmente instrumentalizadas a partir de 2000, tendo seus fornos retangulares controlados por sistemas supervisórios de monitoramento da temperatura, associado a um programa de gerenciamento de fornadas. Com o uso desse sistema, a empresa obteve ganho médio acumulado de 20% na conversão da madeira (RAAD, 2001).

A empresa APERAM Bioenergia implantou o sistema supervisório de acompanhamento da temperatura e tempo de cada ciclo de carbonização. Por meio de termopares coleta-se a temperatura do forno, e essa é enviada ao sistema, formando um banco

de dados. O sistema analisa as informações e, em seguida, mostra o detalhamento do processo, permitindo realizar a tomada de decisão para intervenção no forno por meio de válvulas, sejam elas manuais ou com selo d'água, que regulam a entrada de oxigênio. A implantação do sistema supervisório gerou ganhos de 1,5% em rendimento gravimétrico (APERAM, 2016).

Outras empresas já implementaram o uso da pirometria e/ou do sistema supervisório para controle de processo e melhorias na qualidade e rendimento de carvão vegetal e estão partindo para a automação da carbonização. A difusão destas melhorias é objetivo constante do Grupo G6 – Grupo de Pesquisa em Carvão Vegetal, que estuda e aprimora a utilização destas tecnologias, bem como o desenvolvimento de outras que sejam capazes de viabilizar a produção de carvão vegetal (CARNEIRO e SURDI, 2018).

Apesar dos significativos ganhos obtidos por meio do controle de processo, outro potencial recurso que contribuiria para tal finalidade é o aproveitamento energético dos gases da carbonização. De acordo com Damásio et al. (2015), avaliando o efeito do controle da carbonização em fornos circulares, os autores relataram rendimento em carvão vegetal superior a 33%, sendo o restante transformado em gases e liberados na atmosfera.

Por sua vez, Canal et al. (2016), em estudos sobre faixas de degradação térmica da madeira e emissões de gases da carbonização, observaram aumentos progressivos das emissões gasosas em temperaturas superiores a 200 °C e picos de emissões de gases condensáveis e não condensáveis na faixa de temperatura que vai de 300 a 350 °C. Neste mesmo estudo, os autores observaram liberações, com base no volume dos gases, de 26,28% de gases condensáveis; 32,69% de CO₂; 11,58% de CO e, 0,14% de H₂ em temperaturas próximas à 300 °C, além de 2,81% de CH₄ na faixa de temperatura próximo a 400 °C.

Já Gomes et al. (2019), realizando estudos utilizando técnica de dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) em sistemas de carbonização, constataram valores médios de poder calorífico inferior dos gases da carbonização igual a 2,39 MJ.kg⁻¹ e vazão mássica igual a 0,626 kg.s⁻¹. De acordo com estes estudos, constata-se o elevado potencial e necessidade de aproveitamento energético dos gases da carbonização, uma vez que são formados por compostos inflamáveis, com potencial poluidor e suficiente para abastecimento de equipamentos de queima/câmaras de combustão.

Dessa forma, devido à excessiva formação de gases na carbonização (> 60% do volume de gases), Fávero et al. (2007), desenvolveram um equipamento de queima do alcatrão gerado no processo de carbonização. O equipamento é formado por três aparatos (fornecimento de combustível, fornecimento de ar e geração de gases quentes) para combustão dos gases da

pirólise e posterior secagem da madeira antes da carbonização. O fornecimento de gases quentes decorre da queima de outros combustíveis, por exemplo, álcool e gás liquefeito de petróleo (GLP) para sustentação da chama piloto. Apesar da necessidade de um aparato para condensação dos gases de carbonizações anteriores e o uso de outras fontes energéticas, os autores observaram ganhos de 5% no rendimento gravimétrico e redução no tempo de carbonização. Neste sentido, o desenvolvimento de queimadores de gases para redução das emissões durante o processo de carbonização foi outro avanço tecnológico possibilitando, através do processo de combustão, que fossem convertidos em dióxido de carbono, água e energia térmica.

O queimador, ou fornalha, consiste num equipamento composto, principalmente, por câmara de combustão e chaminé. A câmara de combustão é conectada aos fornos de carbonização por meio de dutos e a tiragem dos gases de dentro do forno ocorre devido à pressão negativa gerada pela chaminé, a qual é aumentada com o incremento da temperatura da câmara de combustão (CARNEIRO et al., 2013). A queima dos gases da carbonização pode ser uma alternativa viável para o desenvolvimento sustentável do setor de produção de carvão vegetal. A temperatura na câmara de combustão da fornalha atinge valores superiores a 850 °C, evidenciando que a energia liberada pelo sistema pode ser utilizada para secagem da madeira (CARDOSO et al., 2010; COSTA, 2012; OLIVEIRA et al., 2013; DONATO, 2017; SANTOS et al., 2017).

4. SECAGEM DA MADEIRA

As árvores, durante seu desenvolvimento, necessitam de água para realizar suas funções fisiológicas e que, após o corte, são removidas naturalmente da madeira devido às interações com o ambiente (MORESCHI, 2012). Logo, a secagem da madeira é o primeiro tratamento realizado após a colheita da árvore, e representa uma etapa fundamental conforme a destinação final do uso da madeira.

Zanuncio et al. (2013), avaliando a secagem de toras de *Eucalyptus* spp e *Corymbia citriodora*, observaram valores médios de máximo teor de umidade (MTU) variando de 76,72% a 140,71% para *C. citriodora* e híbrido natural de *E. urophylla*, respectivamente. Neste sentido, é possível encontrar na literatura diversos estudos sobre a relação água-madeira, que relatam os tipos de água e como ela está presente na madeira.

De modo geral, em árvores recém-cortadas, as paredes das células encontram-se saturadas, estando a água presente na forma líquida, mistura líquido-vapor e/ou vapor. Com base nisto, tanto no lúmen quanto na parede das células, estas diferentes formas da água são divididas em: “água livre”, que existe no lúmen das células e “água ligada” ou “água de adesão”, que está dentro ou diretamente ligada à parede das células (SKAAR, 1988; BERRY E RODERICK, 2005; ZELINKA et al., 2012).

Segundo Perre e Keeey (2014), a “água livre” refere à água na forma líquida presente nas cavidades celulares, que se encontra ligada à matriz sólida da madeira por meio de forças capilares. De acordo com Skaar (1972a), a energia necessária para retirada da água livre da madeira corresponde a 569 kcal/kg. Com a saída gradual da água líquida, nas cavidades celulares, a umidade na madeira passa para a forma líquido-vapor, demandando mais energia para retirada da mesma até atingir o ponto de saturação das fibras (PSF ~ 28% de umidade).

Um dos principais conceitos sobre PSF foi o proposto por Tiemann (1906 *apud* Engelund et al., 2013), que define que o teor de umidade no ponto de transição do estado saturado para o insaturado é conhecido por ponto de saturação das fibras (PSF). O mesmo autor cita que este comportamento ocorre quando os lúmens estão vazios de toda a água líquida, as paredes celulares então começam a secar e a resistência para retirada da água na madeira começa a aumentar.

Com a saída da água livre, as paredes das células começam a ficar insaturadas e inicia-se a retirada da água que está diretamente ligada à sua matriz sólida, a água de adesão. Segundo Skaar (1972b), a energia necessária para retirada da água de adesão da madeira corresponde a 829 kcal/kg, desta forma, entende-se que a retirada da água livre ocorre mais facilmente quando comparada à água de adesão, devido à menor demanda energética, impactando diretamente a taxa de secagem da madeira.

Na secagem da madeira para carbonização, objetiva-se retirar, principalmente, a água livre. Neste sentido, a secagem tem como finalidade reduzir o teor de umidade no menor tempo possível sem afetar as propriedades da madeira. A taxa de secagem da madeira é dividida em três fases distintas (Figura 1).

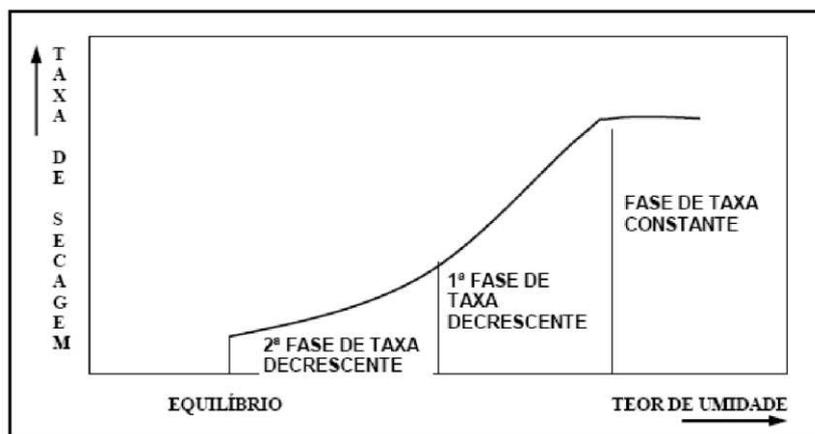


Figura 1 - Curva característica de secagem para materiais porosos
(Rosen, 1983; *apud* Jankowsky et al., 2003).

De acordo com Jankowsky et al. (2003), na fase de secagem com taxa constante não ocorre variação na velocidade de secagem, prevalecendo a movimentação da água até a superfície da madeira por força de capilaridade. Nessa fase inicial a água é removida pela corrente de ar (convecção), a qual é responsável pela transferência de calor do ar para a madeira, causando a vaporização superficial da água e gerando um gradiente radial de umidade na madeira.

Com a redução da água líquida que chega à superfície da madeira, inicia-se a 1ª fase de taxa de secagem decrescente. Após as restrições do fluxo capilar em conduzir a água até a superfície da madeira, o teor de umidade atinge o ponto de saturação das fibras (PSF) ($\pm 28\%$). Neste estágio, abaixo do PSF, a vaporização gera o gradiente de umidade entre as partes mais próximas da superfície da madeira e as partes mais próximas do centro. Na 2ª fase de taxa de secagem decrescente, a movimentação da água se restringe ao interior da peça, não havendo mais água livre na madeira.

Com base no entendimento da dinâmica de secagem da madeira, na fase de taxa constante, a estrutura anatômica e o ambiente externo destacam-se como os principais fatores que exercem influência na secagem. Na 1ª e 2ª fase decrescente, a taxa de secagem sofre influência tanto da permeabilidade quanto da densidade da madeira, sendo esta última responsável quase que exclusivamente por afetar a 2ª fase decrescente (JANKOWSKI et al., 2003).

Diante disto, para propor métodos de secagem eficientes da madeira, é necessário conhecer os fatores que a afetam para adequar aos diversos tipos de uso final, em especial à carbonização.

4.1. Fatores que afetam a secagem da madeira

A secagem da madeira é influenciada por diversos fatores, alguns inerentes ao método de secagem, outros à própria madeira, o que objetiva a homogeneização ou redução destes para obtenção de resultados eficientes. A massa específica, a estrutura anatômica, o teor de umidade inicial e as dimensões são os principais fatores inerentes à madeira (SUSIN, 2012). A massa específica da madeira, ou densidade, é uma das principais propriedades para escolha de espécies destinadas à carbonização. As propriedades do carvão vegetal estão diretamente ligadas à qualidade da madeira (TRUGILHO et al., 2005), logo, opta-se por espécies com maior densidade.

Zanuncio et al. (2015), em estudos com espécies do gênero *Corymbia* e *Eucalyptus* em diferentes condições de secagem, verificaram que espécies com menor densidade básica apresentaram maior teor de umidade iniciais. Estes mesmos autores citam que madeiras com menor densidade têm maior quantidade de espaços vazios, os quais são preenchidos com água, o que aumenta a umidade da madeira. No entanto, ressaltam que esses mesmos espaços facilitam a saída da água na madeira, aumentando a taxa de secagem.

Complementar a estas observações, Monteiro et al. (2018), avaliando o fluxo da água livre e de adesão em toras curtas de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*, ambos com densidade básica média igual a 610 e 510,5 kg.m⁻³, respectivamente, observaram taxa de fluxo total de água próximos a 0,300 e 0,345 g.cm⁻².h⁻¹, respectivamente. Os autores concluíram que o fluxo total de água na madeira é inversamente proporcional à densidade básica, sendo fundamental avaliar outros indicadores de qualidade da madeira para seleção de materiais genéticos.

Apesar da densidade básica da madeira ser um dos principais indicadores de qualidade para produção de carvão vegetal, esta propriedade está relacionada diretamente à anatomia da madeira. Neste sentido, variações na densidade dependem de mudanças nas estruturas anatômicas que compõem o lenho (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

Espécies do gênero *Eucalyptus* são mais usuais para produção de carvão vegetal, e por estar contido no grupo das folhosas, o lenho é constituído por fibras libriformes, fibrotraqueóides, elementos de vasos e células parenquimáticas (BURGER e RICHTER; *apud* CARDOSO, 2015). A junção destes aspectos anatômicos, bem como o tamanho, quantidade e

distribuição dos poros, afeta a permeabilidade da madeira. A conexão entre eles ocorre através das pontuações e entre elementos de vasos, facilitando a movimentação da água na madeira, entretanto, a presença de gomas, tilos e outras substâncias obstrutoras reduzem sua permeabilidade (GARBE, 2008).

Sobre a permeabilidade, na madeira das angiospermas delimitam-se duas regiões com diferentes funções na planta e que têm influência direta sobre a secagem, a região do cerne e do alburno. Costa (2001) cita o alburno como tecido lenhoso logo abaixo da casca, geralmente com coloração clara e constituído de células fisiologicamente ativas não obstruídas. O cerne é a camada mais interna em relação a esta estrutura, sem atividade fisiológica e com coloração mais escura. Devido às funções fisiológicas inativas e obstrução dos vasos por tilos, de modo geral, a presença do cerne dificulta a secagem da madeira, uma vez que reduz a movimentação da água nesta região.

De acordo com Brito et al. (2019), avaliando a permeabilidade da madeira de cerne e alburno de três espécies de eucalipto, os valores médios de permeabilidade do alburno igual a 296,9; 304,2 e 347,5 $\text{cm}^3/\text{cm}.\text{atm}.\text{s}$ para *Eucalyptus grandis* (A), *Eucalyptus grandis* (B) e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, respectivamente. Os autores concluíram que a permeabilidade do cerne foi considerada baixa (variação de 0 a 3,9 $\text{cm}^3/\text{cm}.\text{atm}.\text{s}$) devido a obstruções dos vasos por tiloses e outras substâncias.

Além disso, Oliveira et al. (2005), avaliando a variação do teor de umidade radial e longitudinal em troncos de árvores de sete espécies do gênero *Eucalyptus*, observaram que, de modo geral, há elevados teores de umidade na região da base próxima à medula (> 100% para *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus paniculata*) e valores menores na região do alburno, próximo à casca. Os autores concluíram que a base dos troncos detém elevados teores de umidade, que diminuem até sua metade e aumentam a partir do terço superior, sendo que os valores apresentados no topo são próximos aos encontrados na base da árvore.

Os comportamentos observados por Brito et al. (2019) e Oliveira et al. (2005), demonstram a importância da seleção de materiais genéticos com menor relação cerne/alburno e da classificação de toras em função das suas dimensões, implicando na época de uso, bem como no planejamento do programa de secagem adotado.

Baseando-se nessas informações, é possível concluir que toras com maiores dimensões impactam diretamente a secagem da madeira, demonstrando relação inversa com a velocidade de secagem devido à maior distância a ser percorrida pela água. Essa tendência foi observada

por Oliveira et al. (2017) em estudos com secagem de toras de *Eucalyptus* com 1 metro de comprimento e diferentes diâmetros, os autores constataram que, de modo geral, toras de menor diâmetro (8 – 12 cm) possuem taxa média de secagem superior em relação às aquelas de maior diâmetro (16,1 – 20 cm).

Outro estudo que corrobora tal percepção foi desenvolvido por Abrahão et al. (2016) ao avaliar o efeito do diâmetro e comprimento das toras na secagem natural de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis*. Aos 110 dias de secagem em campo, os autores não observaram um padrão definido de secagem para toras com diâmetro < 11 cm em função do comprimento. Os resultados mostraram que, para toras com comprimentos de 2,0 metros, as extremidades e o centro detêm maior teor de umidade; toras com 3,7 metros possuem o centro mais úmido que as extremidades e toras com 5,0 metros na extremidade basal detêm maior teor de umidade até a metade do comprimento, sendo que, a partir daí o teor de umidade reduz em direção à extremidade de menor diâmetro.

Donato et al. (2017) descreveram comportamento semelhante para toras com 4,5 metros de comprimento, evidenciando o efeito de conicidade. Os autores observaram que, para este comprimento, o teor de umidade é maior na extremidade basal quando comparado à extremidade de menor diâmetro. Entretanto, de modo geral, para toras com 1,5; 3,0 e 4,5 metros de comprimento, independente do diâmetro, a umidade é maior no centro da tora e menor nas extremidades.

Dessa forma, tão importante quanto conhecer os fatores inerentes à madeira, é fundamental entender os fatores que afetam sua secagem para o desenvolvimento de programas de secagem eficientes e com maior homogeneidade. Neste sentido, deve-se atentar aos fatores climáticos e de estocagem da madeira, considerando a temperatura, umidade relativa, direção e velocidade do ar. Em conjunto, o empilhamento, a altura da pilha e a disposição das mesmas em função da direção dos ventos, consistem em alguns fatores já estudados.

Assim, para fins de carbonização, dois métodos de secagem da madeira podem ser considerados: a secagem natural e a secagem artificial. Ambos são usualmente praticados e têm grande impacto nas etapas de planejamento e produção do carvão vegetal, bem como na qualidade do produto final.

Na secagem ao ar livre, para que esta ocorra de forma eficiente, quanto maior a temperatura do ar, mais rápida será a taxa de secagem, devido ao maior fornecimento de energia a ela e, por consequência, às moléculas de água, no menor tempo possível (REZENDE,

2009). Neste sentido, Rezende et al. (2010), avaliando a secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus urophylla* aos 8 anos de idade, na cidade de Paraopebas – MG, com temperatura média anual de 20,9 °C, observaram que, após 80 dias de secagem, as toras possuíam 50% de teor de umidade. Apesar da redução de 75% do máximo teor de umidade (taxa de secagem ~ 0,04 %hora⁻¹), as toras não atingiram o mínimo teor recomendado para a carbonização (< 30 % de umidade).

Já em ambientes controlados, como na secagem artificial, o sistema de aquecimento fica encarregado da função de fornecimento de energia. Oliveira et al. (2017), avaliando 5 temperaturas (50, 75, 100, 125 e 150 °C) na secagem de toras de *Eucalyptus urophylla* com 1 metro de comprimento, observaram o aumento da taxa de secagem em função do aumento de temperatura. Os maiores valores de taxa de secagem foram alcançados em temperaturas de 125 e 150 °C, sendo 1,64 e 1,67 %hora⁻¹, respectivamente. Esses valores foram 55% superiores aos observados para a secagem a 100 °C, e atingiram o mínimo desejado para carbonização (< 30%) em menos de 48 horas.

Com base nestas informações, quanto maior a temperatura, maior a velocidade de secagem, pois o calor é a fonte por meio da qual as moléculas de água na madeira adquirem energia cinética necessária para evaporação. Vale ressaltar a importância da circulação do ar em equipamentos de secagem, visto o papel da temperatura em retirar a umidade da madeira e a necessidade de renovação do fluido para retirada da umidade do ambiente. Neste sentido, outro fator que interfere na secagem é a umidade relativa do ar.

Este parâmetro representa o quão úmido ou seco o ambiente está e, devido à dinâmica com a superfície da madeira, ocorre a retirada da água vaporizada. Assim, menor umidade relativa do ambiente resulta em maior velocidade de secagem (STEIN, 2003). Em períodos de chuva, a umidade relativa do ar tende a ser maior, reduzindo a eficiência na secagem, principalmente quando praticada ao ar livre. Por outro lado, na secagem artificial, o ar quente e seco, oriundo da fonte de calor, permeia a carga de madeira, retirando sua umidade e a do ambiente. É válido destacar a importância desempenhada pelo fluxo de ar no processo de secagem, uma vez que este exerce duas funções básicas: transferência de calor para a superfície da madeira e transferência de massa da superfície da madeira para o ambiente.

A velocidade de circulação do ar atua de forma conjunta com as demais condições climáticas na secagem da madeira. Quanto maior a ventilação, mais eficiente será a retirada da umidade, principalmente na fase inicial da secagem, onde a transferência de calor para a superfície da madeira passa a ser o fator mais importante. De acordo com Ducatti (2000), à

medida que a madeira diminui o teor de umidade, a transferência de calor da superfície para o interior passa a ser o fator limitante. Neste sentido, para melhor aproveitamento deste parâmetro, deve-se levar em consideração o empilhamento das toras na mesma direção do vento, resultando em melhor permeabilidade do ar na carga de madeira.

Já na secagem artificial, a velocidade é controlada pelo sistema de ventilação, de modo que o gás permeie toda a carga de madeira e seja retirado pelo sistema de exaustão ou liberado pela chaminé do equipamento. Cabe salientar que o sistema de ventilação deve ser dimensionado suficientemente para que a perda de carga dos gases aquecidos seja inferior à camada limite do fluido.

4.2. Secagem natural da madeira

O processo de secagem natural da madeira, ou ao ar livre, é o método mais difundido para fins de carbonização. Este consiste no empilhamento das toras no próprio talhão, entre as linhas de plantio, ou na borda, próximo ao local de colheita, sofrendo influência das condições climáticas, como temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, além do arranjo das pilhas de madeira.

Em virtudes das boas condições climáticas tropicais no Brasil, a secagem natural tem sido a prática mais usual como pré-tratamento, ou tratamento definitivo, desde a colheita da árvore até a unidade produtora de carvão vegetal. É um método com custos relativamente baixos, porém, com longo tempo de secagem em relação à secagem artificial (ROSSO, 2006).

Desde o planejamento da colheita da árvore até o enforamento da madeira para produção do carvão vegetal, são evidentes os gargalos da secagem natural, como, por exemplo, o longo tempo do capital estagnado no campo e as perdas de massa seca em função do ataque de patógenos e apodrecimento da madeira no campo.

Monteiro et al. (2018), avaliando o fluxo de água na madeira de clones de eucalipto, constataram para *Eucalyptus urophylla* (densidade básica = 498 kg.m⁻³) em torno de 74 dias para atingir 30% de umidade. Já Zanuncio et al. (2013), avaliando a secagem ao ar livre de 7 clones de eucalipto, observaram que, aos 90 dias de secagem, apenas as toras retiradas a 100% da altura comercial (diâmetro = 5 cm) atingiram valores mínimos para carbonização (< 30%).

Outro estudo que demonstra a suscetibilidade da madeira à secagem ao ar livre foi realizado por Alcântara et al. (2015), avaliando alterações na madeira de *Eucalyptus dunnii* após ataque de *Pleorotus ostreatus*, fungo causador da podridão branca (degradam lignina),

observaram 7,59% de perda de massa em 131 dias. Neste sentido, considerando o custo médio do metro estéreo de lenha de eucalipto a R\$60,00; as perdas econômicas chegariam a R\$9.108,00 para produção de 1000 metros de carvão vegetal.

Apesar da secagem natural, ou ao ar livre, ser uma técnica amplamente utilizada pelo setor, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que reduzam o tempo de secagem da madeira no campo e, principalmente, melhor aproveitamento energético dos coprodutos gerados no processo de carbonização. Dessa forma, a secagem artificial da madeira utilizando como insumo os gases combustos da carbonização, para secagem dentro do forno, passa a ser uma alternativa viável para os pequenos, médios e grandes produtores de carvão vegetal.

4.3. Secagem artificial da madeira

Nas últimas décadas, pesquisas sobre secagem artificial da madeira têm sido amplamente desenvolvidas para aplicação em madeira serrada. De acordo com Jankowsky e Luiz (2006), até 2004, no Brasil, a secagem convencional em estufa foi o método mais aplicado no ramo industrial e, neste contexto, alguns estudos voltados para secagem em estufa solar também evoluíram, ambos aplicados à secagem de madeira serrada de eucalipto.

Contudo, para fins de carbonização, a madeira é utilizada em toras e os resultados esperados com a secagem artificial diferem, em partes, dos obtidos para madeira serrada. Apesar da semelhança entre os fundamentos da secagem artificial, para cada método utilizado, desconsideram-se os defeitos (empenamentos, colapso e rachaduras) causados por esse tipo de secagem quando a madeira em toras é destinada à carbonização.

Neste sentido, a secagem artificial de toras consiste em submetê-las a um ambiente de temperatura, umidade relativa e velocidade controlada, de modo a promover a movimentação da água na madeira do seu interior para a superfície, ocasionando a evaporação da água superficial (JANKOWSKY, 1995). Este mesmo autor cita que, para controle desses parâmetros do processo de secagem, os secadores convencionais de madeira são equipados com sistema de aquecimento, sistema de umidificação do ar, conjunto de *dampers*, ou janelas que permitem a troca de ar entre o interior do secador e o meio externo, e sistema de ventilação para promover a circulação do ar entre as peças de madeira em secagem.

Contudo, para a secagem artificial de toras, apesar de a literatura disponível ser escassa, a composição dos sistemas de secagem é mais simples, sendo composto por sistema de aquecimento, conjuntos de *dampers* e sistema de ventilação e exaustão, uma vez que os

defeitos são desconsiderados. Com base nisso, Cardoso (2015) desenvolveu um sistema de secagem artificial de toras utilizando os gases oriundos do queimador de gases da carbonização. O sistema desenvolvido era composto por um forno retangular de carbonização que fornecia gases ao queimador. Após a queima dos gases, uma tubulação metálica extraia os gases combustos pela chaminé com auxílio de um exaustor, e os direcionava até o secador metálico. Neste estudo, o sistema de aquecimento era alimentado pelos gases combustos da fornalha; a tubulação metálica era composta por *dampers* para controle da temperatura de entrada dos gases; os exaustores realizavam a tiragem dos gases combustos da fornalha e conduzia-os até o secador, mantendo a velocidade constante. Dentro do secador, o gás combusto permeava a carga com o auxílio de outros ventiladores e sua tiragem era realizada por outro exaustor. O autor realizou testes de secagem por 68 horas com admissão de gases a 150 °C e conseguiu reduzir em 36,45% o teor de umidade da madeira. Neste mesmo estudo, foi observada a possibilidade de ganhos de 1,5 ponto percentual, ou 4,85% a mais de carvão vegetal, evidenciando ganhos em rendimento gravimétrico.

No setor privado, um estudo sobre secagem artificial da madeira foi desenvolvido visando avaliar a eficiência e custos da secagem utilizando secadores metálicos. Em pesquisa, conduzida por Figueiró et al. (2018), foram observados resultados positivos quanto ao teor de umidade da madeira, destacando a redução média de 8%, com incremento de 3,3% no rendimento de carvão vegetal.

Apesar da viabilidade técnica da secagem artificial da madeira em toras utilizando secadores, o sistema tem se mostrado inviável economicamente. Há à necessidade de investimentos em infraestrutura de secadores revestidos com manta cerâmica, equipamentos elétricos, tubulações metálicas e ventiladores. Além disso, há maior movimentação da madeira dentro da planta de carbonização, aumentando as atividades de carregamento e descarregamento do secador e alto consumo de energia elétrica para funcionamento do sistema de secagem.

Neste sentido, há a necessidade do desenvolvimento de estudos que viabilizem a secagem artificial da madeira de modo a gerar competitividade para o carvão vegetal. A secagem dentro do forno poderá ser uma alternativa para o aproveitamento dos gases da carbonização e redução dos investimentos em infraestrutura e movimentação da madeira dentro da planta de carbonização, uma vez que, após a secagem, pode-se proceder à ignição do forno para iniciar o processo de carbonização da madeira.

Visto a importância da secagem da madeira com ganhos significativos pelo método artificial, algumas questões precisam ser elucidadas, como definição da temperatura ótima dos gases para a secagem, o local de inserção dos gases combustos, o tempo mínimo para que a secagem seja efetiva e o impacto no ciclo produtivo do carvão vegetal.

4.4. Aspectos econômicos

Os custos envolvidos na secagem estão relacionados ao transporte da madeira do campo até a unidade produtora de carvão vegetal e, no caso das que realizam a secagem artificial, é acrescido o consumo de energia elétrica, gastos com mão de obra e logística interna da madeira. O transporte florestal, que tem por finalidade deslocar a maior quantidade possível de massa seca no menor tempo, é um dos maiores custos da madeira (MACHADO e LOPES, 2000).

Alguns estudos demonstram que o transporte é um dos fatores de composição do custo logístico de maior valor, sendo o frete responsável por, aproximadamente, 60% do custo logístico total e entre 9 e 10% do produto final (BERGER et al., 2003; RODRIGUES, 2007). O transporte florestal no Brasil é realizado, principalmente, pelo modal rodoviário devido à extensa malha viária, oferta de diferentes tipos de veículos e baixo valor de instalação quando comparado a outros modais existentes.

Os custos do transporte florestal são influenciados pela distância do local de carregamento até a unidade produtora, a quantidade de madeira transportada e a capacidade de carga do veículo (ALVES et al., 2013; MACHADO e LOPES, 2000). De acordo com Alves et al. (2013), analisando os fatores técnicos e de custos de transporte de madeira com diferentes composições veiculares de carga, o uso de tritrem demonstra melhores indicadores de eficiência e disponibilidade mecânica, além de menor custo quando comparado ao uso de bitrem, aproximadamente 24%. Os autores concluíram que, quanto maior for a distância de transporte da madeira, torna-se interessante utilizar veículos com maior capacidade de carga.

Os veículos para transporte de madeira têm capacidade de carga em massa, assim, transportar madeira com alta umidade ocasiona aumento dos custos de operação (TAHVANAINEN e ANTTILA, 2011) devido ao aumento no número de viagens para transportar a mesma quantidade de massa seca. Dessa forma, é fundamental o planejamento da secagem da madeira, seja ela natural ou ao ar livre, seja a secagem artificial, levando em consideração o custo x benefício.

Em estudos sobre a importância da secagem da madeira no transporte florestal para abastecer uma fábrica de celulose, Zanuncio et al. (2017) observaram que a madeira de *E. urophylla* e *C. citriodora*, possuíam, em média, 86,63% e 76% de umidade inicial, respectivamente. Após 30, 60 e 90 dias de secagem no campo, os autores observaram teores de umidade de 40%, 33,47% e 28,47% para *E. urophylla* e 30,4%, 26,23% e 22,8% para *C. citriodora*, respectivamente. Neste estudo, após 90 dias de secagem, foi constatada redução média de 137 viagens por dia para abastecer uma fábrica de celulose e menor consumo de combustível, reduzindo em média 0,041 litros de combustível por tonelada de madeira. Assim, torna-se importante o desenvolvimento de estudos direcionados ao custo de transporte da madeira destinado à produção de carvão vegetal.

Em relação à secagem da madeira, Garais e Bortoli (2019) analisaram os custos de secagem de madeira serrada em uma estufa convencional com capacidade de 33 m³ e localizada a 19,4 km de distância da área de colheita. Estes relatam para custos de transporte, de secagem e de mão de obra valores próximos a R\$2,00, R\$120,00 e R\$0,46 por metro cúbico de madeira, respectivamente, totalizando R\$122,46/m³. Neste mesmo estudo, como comparação, foi avaliada a instalação de um túnel de secagem contínuo, com capacidade para secar até 122 m³ de madeira. Os autores relatam como custos totais de secagem no túnel valor médio de R\$37,25/m³, inferior à terceirização da secagem. Vale salientar que, 31% desse custo é relacionado à energia elétrica, 30,29% referente à mão de obra e 38,71% refere-se à geração de calor para secagem da madeira, além disso, os valores praticados devem ser atualizados para os dias atuais e por região do estudo.

Por sua vez, Stargelin et al. (2012), avaliando os custos, viabilidade e potencialidades de dois métodos de secagem – estufa solar e ao ar livre – observaram custos totais de implantação igual a R\$2108,50 e R\$681,00, respectivamente, para estruturas com capacidade de 1 m³. A análise econômica para vida útil de 25 anos, demonstrou valor presente líquido positivo a partir do ano 1, para estufa solar, e ano 2, para secagem ao ar livre. Em relação ao tempo e capacidade de secagem anual, a estufa solar demonstrou capacidade de secagem média de 15 m³/ano, enquanto a secagem ao ar livre foi de 6,95 m³/ano, ressaltando os tempos de 20 e 40 dias de secagem em períodos favoráveis (primavera/verão) e 30 e 75 dias para períodos desfavoráveis (outono/inverno). Os autores relataram que estas variações afetaram o custo médio de produção, demonstrando que, ao término do ciclo de 25 anos, os custos de produção reduziram de R\$63,18 para R\$17,06 e R\$77,84 para R\$16,70 por m³ de madeira seca pelo método da estufa solar e ao ar livre, respectivamente.

Neste sentido, apesar da secagem ao ar livre demonstrar menor custo de investimento e produtividade, o tempo necessário para atingir o teor de umidade ideal impacta a utilização do capital investido. Entretanto, grande parte dos estudos demonstra viabilidade técnica e econômica para secagem de madeira serrada, contudo, em relação à madeira em toras, principal forma de utilização da madeira para fins de carbonização, os estudos são incipientes.

Dessa forma, para a secagem artificial da madeira dentro do forno, há a antecipação da secagem da madeira no campo, e o transporte de maior quantidade de água, sendo necessário avaliar a viabilidade econômica do ganho em produtividade, tempo de planejamento, rendimento e custos operacionais.

5. MATRIZ SWOT – SECAGEM NATURAL x SECAGEM ARTIFICIAL

A sigla *SWOT* (*Strength, Weaknesses, Opportunities e Threats*) significa pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças de qualquer tipo de projeto e aplicada a programas de desenvolvimento estratégico, identificando pontos passíveis de melhorias e minimização de perdas. A partir da elaboração e análise da matriz SWOT a percepção dos atributos e dificuldades são facilitados, permitindo a resolução dos fatores internos, além da visualização de perigos, atitudes de risco e oportunidades externas (JOHNSON et al., 2008).

Com base nas relevantes informações sobre secagem da madeira, seja de cunho científico ou tecnológico, além de percepções práticas adquiridas por meio do conhecimento de campo, foi possível elaborar uma análise SWOT neste estudo. Diante das informações relatadas em Secagem da Madeira (tópico 3), pode-se criar uma matriz SWOT da secagem natural *versus* secagem artificial da madeira (Tabela 1).

Tabela 1 – Matriz SWOT de secagem natural x secagem artificial da madeira dentro do forno

		Fatores Positivos	Fatores Negativos
Interno	Forças	Tempo do capital estagnado no campo Ganhos em rendimento gravimétrico Qualidade do carvão vegetal	Fraquezas Custos operacionais Investimentos em infraestrutura Consumo elétrico
	Oportunidades	Carência de pacote tecnológico Aproveitamento energético da madeira Vantagens em relação à secagem natural	Ameaças Ciclo operacional das empresas Falta de infraestrutura básica em unidades de produção
	Externo		

Foram identificados 11 fatores que afetam direta e indiretamente os aspectos econômicos e tecnológicos da secagem da madeira. Uma das principais características de força oferecida pela secagem artificial é a redução do tempo que o capital (madeira) fica estagnado em campo. Em média, as florestas destinadas a fins de carbonização são colhidas em idade técnica de corte próximo aos 7 anos de idade, em seguida, estas ficam em campo por mais 90 a 150 dias, dependendo da região. Com a secagem artificial, alguns estudos demonstram redução significativa neste tempo, em alguns casos, mais de 50% do tempo para atingir o teor de umidade ideal para carbonização (< 40%) (COPAM, 2018).

Além disso, os ganhos em rendimento gravimétrico e qualidade do carvão vegetal são forças que representam a busca atual pelas empresas e produtores independentes de carvão vegetal e alguns estudos consolidam esta percepção (CARDOSO, 2015; FIGUEIRÓ et al., 2018). Por outro lado, as fraquezas da secagem artificial estão relacionadas aos investimentos em infraestrutura que, muitas vezes, demandam materiais isolantes e metais que detêm vida útil limitada, além de mão de obra qualificada para instalação, fatores que encarecem os projetos.

Vale ressaltar os custos com energia elétrica para funcionamento de ventiladores e exaustores responsáveis pela movimentação e renovação dos gases utilizados na secagem, bem como os custos operacionais de manuseio da carga de madeira dentro das unidades produtoras de carvão vegetal. Contudo, estas fraquezas são passíveis de minimização para implantação de projetos com esta finalidade, visto os ganhos almejados. Além do mais, alguns pontos fracos podem ser associados a oportunidades de desenvolvimento de materiais construtivos mais resistentes e equipamentos de menor consumo elétrico.

Neste sentido, associado a esses fatores, a carência de pacotes tecnológicos sobre secagem artificial para fins de carbonização demonstra grande potencial para desenvolvimento de pesquisas pilotos, que podem definir melhores tempos de secagem, temperaturas e distribuição dos gases no secador, além de impactar o ciclo produtivo. Visto que na carbonização, em média, 30% da madeira é transformada em material sólido (carvão vegetal) e 70% em gases que são liberados na atmosfera ou queimados em determinadas unidades, o retorno destes para o processo visa melhor aproveitamento energético da madeira, com potencialidades para secagem, devido a temperatura que estes gases atingem durante a combustão (~ 600 °C).

As ameaças, bem como as fraquezas, devem ser evitadas ou minimizadas. Conforme mostrado, a secagem artificial demanda o uso de energia elétrica para funcionamento dos equipamentos elétricos e eletrônicos, geralmente as unidades produtoras são construídas distante de redes elétricas e comunidades, impossibilitando a instalação de secadores ou adaptação de sistemas para realizar a secagem artificial. Contudo, o planejamento de instalação das unidades produtoras consiste em uma etapa fundamental para desenvolvimento destes projetos. Além disso, tão importante quanto, é o planejamento da metodologia de secagem artificial a ser implantada, uma vez que o tempo necessário para secagem artificial da madeira deve ser considerado no ciclo produtivo do carvão vegetal, devendo ser adequado à capacidade produtiva mensal/anual das unidades produtoras, bem como às etapas de colheita e transporte da madeira do campo.

6. CONCLUSÕES

A produção de carvão vegetal no Brasil tem tido grandes avanços na parte tecnológica no que diz respeito à sustentabilidade. No entanto, a secagem da madeira tem sido um gargalo para o processo produtivo.

Apesar dos esforços voltados ao desenvolvimento do setor de produção de carvão vegetal, nota-se a necessidade de estudos que viabilizem a secagem artificial da madeira em toras, pois assim é possível alcançar maiores ganhos em rendimento e qualidade do carvão vegetal.

A secagem artificial da madeira utilizando os gases combustos da carbonização consiste em uma alternativa promissora para o ganho em tempo de planejamento, aumento de rendimento e qualidade do carvão vegetal. Vale ressaltar as vantagens apresentadas pela secagem da madeira dentro do próprio forno de carbonização, visando redução de custos de investimento e operacionais.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Sociedade de Investigações Florestais (SIF) e a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo aporte das bolsas de estudos; a Empresa ArcelorMittal pelo

financiamento da pesquisa, ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV) e Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) pelo aporte em infraestrutura e desenvolvimento deste estudo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAO, C. P.; ROCHA, L. C. S.; PAULA, H.; TRINDADE, E. G. B.; ANDRADE, H. B.; SANTANA, R. C. Efeito do diâmetro e comprimento das toras na secagem da lenha de um clone de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v.44, n. 109, p. 85-93, 2016. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n109.08](https://doi.org/10.18671/scifor.v44n109.08)

ALCÂNTARA, M. C.; LIMA, E. A. de; GOES, B. C.; HELM, C. V.; AUER, C. G.; ZEFERINO, I. **Efeitos do ataque de fungos de podridão nas características da madeira de eucalipto**. In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE: anais. Curitiba-PR, 2015. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/131775/1/2015-EdsonL-CFP-Efeitos.pdf>>

ALVES, R. T.; FIEDLER, N. C.; SILVA, E. N.; LOPES, E. S.; CARMO, F. C. S. Technical analysis and transportation costs of wood with different types of vehicles. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p.897-904, 2013.

APERAM Bioenergia. Supervisório & Automação – Tecnologia na produção de carvão vegetal a caminho do futuro. **Qualidade em Ação**. Ano II, n.3, 2016, 2p.

BERRY, S.L.; RODERICK, M. L. **Plant–water relations and the fibre saturation point**. *New Phytol*, 2005, 168p.

BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil: Gestões econômicas e ambientais. **Energia**, São Paulo, n.64, 1990.

BRITO, A. S.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. G. M.; RODRIGUES, B. P.; CARNEIRO, A. C. O. Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of *Eucalyptus* wood. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.1, 9p. 2019. DOI: <http://doi.org/10.1590/2179-8087.037818>

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. Ed. São Paulo, 1991. 154 p.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C.O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, B. L. C.; DONATO, D. B. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Forestalis**, Piracicaba – SP, v.44, n.112, p 831-840, 2016. DOI:[dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n112.05](https://doi.org/10.18671/scifor.v44n112.05)

CARDOSO, M. T. **Secagem de toras para produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases da carbonização**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). 2015. 74p. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; 2015.

CARDOSO, M.T.; DAMÁSIO, R.A.P.; CARNEIRO, A.C.O.; JACOVINE, L.A.G.; VITAL, B.R.; BARCELLOS, D. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras, MG. vol.16: p.115-124. 2010

CARNEIRO, A. C. O.; SURDI, P. G. **Coletâneas de trabalhos científicos do grupo G6**. Viçosa, 2018. 182p.

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.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e Biorefinarias: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Ed. UFV, 2013, 551 p.

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. **Revista Árvore**; v. 36: p.787-796. 2012.

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental – MG. **Deliberação Normativa COPAM nº 227, de 29 de Agosto de 2018**. Disponível em: < http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/REGULARIZACAO/TRs/Termo_de_Refer%C3%Aancia_para_cumprimento_da_DN_COPAM_N_227_2018_quanto_%C3%A0_performance_da_produ%C3%A7%C3%A3o_de_carv%C3%A3o_vegetal_proveniente_de_floresta_plantada.docx > Acesso em: 25 de maio de 2019.

COSTA, J.M.F.N. **Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução de metano, como base à geração de créditos de carbono**. [Dissertação]. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; 2012.

COSTA, A. **Coletânea de anatomia da madeira**. 42p., 2001.

DAMÁSIO, R. A. P.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; BARCELOS, D. C.; PEREIRA, B. L. C.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, C. M. S. Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Revista Ciência da Madeira**, v.6, n.1, p. 11-22, 2015. < DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6i1p11-22 >

DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C.O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; CANDIDO, W. L.; MAGALHAES, M. A.; SILVA, C. M. S. Secagem e perfil de umidade da tora em função do diâmetro e comprimento. **Agroflorestalis News**, v.2, n.2, 8p. 2017.

DONATO, D. B. **Desenvolvimento e avaliação de fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 98p.

DUCATTI, M. A. **Diagnóstico da secagem convencional de madeiras no estado de São Paulo**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 96p.

ENGELUND, E. T.; THYGESSEN, L. G.; SVENSSON, S.; HILL, C. A. S. A critical discussion of the physics of wood-water interactions. **Wood Science Technology**, v.47, p. 141-161, 2013.

FÁVERO, G. C.; VALLE, R. M.; DUARTE, T. M. Análise térmica de um sistema de combustão de alcatrão em fornos retangulares para secagem da madeira. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA. **Anais**. Cusco – Peru, 8p. 2007.

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

GARAI, E. S.; BORTOLI, S. Análise do custo de secagem de madeira: um comparativo entre estufas terceirizadas e em túnel de secagem próprio. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Anais**. Ponta Grossa – PR, 2019.

GARBE, E. A. **Gradiente de umidade e tensões na madeira**: relação água- madeira. Curitiba: UFPR, 2008. 15 p.

GOMES, A. F.; MARTINS, M. A.; PEREIRA, E. G. Simulação computacional de dispositivo de mistura em câmara de combustão para gases de carbonização. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria – RS, v. 29, n. 2, p. 673-684, abr./jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509827196>

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2020**. Rio de Janeiro, RJ: IABR, 89 p., 2020.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário Estatístico da Indústria Brasileira de Árvores**: ano base 2019 – Relatório 2020. Brasília, DF: IBÁ; 66 p., 2020.

JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para secagem de madeiras. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. **Anais**. Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. 109-118p.

JANKOWSKY, I. P.; SANTOS, G. R. V; ANDRADE, A. Secagem da madeira serrada de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba-SP, Circular Técnica n.199, p. 1-11, 2003.

JANKOWSKY, I. P.; LUIZ, M. G. Review of wood drying research in Brazil: 1984-2004. **Drying Technology**, v.24, 447-455p., 2006. DOI: 10.1080/07373930600611893

JOHNSON G.; SCHOLLES K.; WHITTINGTON R.; FRÉRY F. **Stratégique**, 8^a édition, Pearson Education, 2008.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Analysis of the effect of eucalypt log length on the productivity and cost of wood harvesting and transport. **Cerne**, v. 6, n. 2, p. 124-129, 2000.

MONTEIRO, T.; LIMA, J.; SILVA, J.; ZANUNCIO, A. J.; BARAÚNA, E. Water flow evaluation in *Eucalyptus* and *Corymbia* short logs. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 2. 7p. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.065917>

MORESCHI, J. C. **Propriedades da Madeira**, 4^a edição. Curitiba-PR: UFPR, 2012. 208p

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, v 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. Variação do teor de umidade e densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; PEREIRA, B.L.C.; VITAL, B.R.; CARVALHO, A.M.M.L.; TRUGILHO, P.F. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**. V.37: p.557-566. 2013.

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 temperature. **Revista Árvore**, Viçosa, v 41, n. 2, p.1-9, 2017. <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000200007>>

PERRE, P.; KEEY, R. B. Drying of wood: principles and practice. In: MUJUMDAR, A. S.; **Handbook of industry drying**. 40^o Edition. CRC Press, Boca Raton, FL, 2014, 1423p.

RAAD, T.J. **Instrumentação e Controle de Processo de Carbonização dos Fornos Industriais da V&M Florestal**. 1^o Congresso Internacional de uso da biomassa plantada para a produção de metais e geração de eletricidade. Belo Horizonte, Brasil, 2001.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; ANDRADE, H. B.; FARIA, A. L. R. Air drying of logs from *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. **Cerne**, v.16, n.4, p.565-572, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602010000400016>>.

REZENDE, R. N. **Secagem de toras de clones de *Eucalyptus* empregados na produção de carvão**. 2009.178p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

RODRIGUES, P. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil e à logística internacional**. 4.ed. São Paulo: Aduaneiras, 2007.

ROSEN, H. N. Recent advances in the theory of drying lumber, In: IUFRO DIVISION V CONFERENCE, **Proceedings**, Illinois: USDA, p. 32-62. 1983.

ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de *Eucalyptus* resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional**. 2006. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

SANTOS, S. F. O. M.; PIEKARSKI, C. M.; UGAYA, C. M. L.; DONATO, D. B.; BRAGHINI JUNIOR, A.; FRANCISCO, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L. Life cycle analysis of charcoal production in masonry kilns with and without carbonization process generated gas combustion. **Sustainability**, v.9, 2017. <[doi:10.3390/su9091558](https://doi.org/10.3390/su9091558)>

SINDIFER – Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. **Anuário Estatístico 2020, ano base 2019**. Belo Horizonte, MG: SINDIFER, 26p., 2020.

- SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972a. 218p
- SKAAR, C. **Wood-water relations**. Springer-Verlag, Berlin, 1972b. 283p
- STEIN, F.R. **Avaliação técnica do tempo de estocagem da madeira**. 2003. 6p. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.
- SUSIN, F. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaboradas com base em testes prévios a alta temperatura**. 2012. Dissertação (Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- TAHVANAINEN, T.; ANTTILA, P. Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland. **Biomass and Bioenergy**, v. 35 n. 8, p. 3360–3375, 2011.
- TIEMANN H. D. **Effect of moisture on the strength and stiffness of wood**. USDA Forest Service, Bulletin 70p., 1906.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial e amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v.11, n.2, p.178-186, 2005.
- VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; VALENTE, O. F. Estimativa do teor de umidade de lenha para carvão em função do tempo de secagem. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n.1, p. 10-27, 1985.
- ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; CARVALHO, A. G.; TRUGILHO, P. F. Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestalis**, Piracicaba – SP, v.41, n.99, p. 353-360, 2013.
- ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, E. M. G. C.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. Propriedades energéticas da madeira e carvão de *Corymbia* e *Eucalyptus* em diferentes condições de secagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v.10, n.3, p.432-436, 2015.
- ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, M. G.; LIMA, J. T. Importance of wood drying to the forest transport and pulp mil supply. **Cerne**, v.23, n.2, p.147-152, 2017.
- ZELINKA, S. L.; LAMBRECHT, M. J.; GLASS, S. V.; WIEDENHOEFT, A. C.; YELLE, D. J. Examination of water phase transitions in Loblolly pine and cell wall components by differential scanning calorimetry. **Thermochimica Acta**, v. 533, p. 39-45, 2012. doi:10.1016/j.tca.2012.01.015

RESUMO

SIQUEIRA, Humberto Fauller, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2021. **Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira dentro de fornos circulares de alvenaria.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

Diante do potencial energético dos gases da carbonização e da geração de energia térmica, o aproveitamento destes pode ser uma alternativa para resolver um grande gargalo da produção de carvão vegetal, a secagem da madeira. A secagem artificial da madeira em toras dentro do próprio forno de carbonização apresenta-se como excelente alternativa, mas há necessidade de estudos sobre aspectos técnicos relacionados à eficiência deste processo. O objetivo deste estudo foi avaliar a secagem artificial da madeira dentro do forno de carbonização utilizando, em primeira etapa, os gases da carbonização e, em segunda etapa, os gases combustos do queimador em diferentes temperaturas e tempos para realização da secagem da madeira em tora. Para a realização do experimento, o sistema fornos-fornalha foi adaptado para o transporte dos gases a serem utilizados para a secagem. Utilizou-se madeira de eucalipto para avaliar a secagem da madeira dentro do forno, a qual foi caracterizada. Na primeira parte do experimento, os gases da carbonização, na saída da chaminé, foram direcionados para os fornos que continham a madeira a ser seca. Na segunda parte, os gases da carbonização foram, primeiramente, direcionados ao queimador de gases e, depois de sua combustão, aos fornos de secagem da madeira. Na primeira parte do estudo utilizaram-se os gases da carbonização provenientes da 1ª, 2ª e 3ª fase da carbonização; e na segunda parte do experimento foram utilizados os gases combustos do queimador, avaliando duas temperaturas (120 e 150°C) e quatro tempos (15, 22,5, 30, 45 e 60 horas) de secagem. A secagem da madeira dentro do forno foi realizada dispondo a madeira de forma idêntica à adotada no forno de carbonização, e antes e após o processo de secagem, realizou-se a pesagem de toda a carga de madeira. Neste contexto, foram calculadas a perda de umidade (%) e a taxa de secagem ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$). Concluiu-se que apenas os gases da 3ª fase da carbonização foram efetivos para a remoção de água da madeira devido à maior temperatura e tempo de residência, reduzindo a umidade da madeira em 12,51%. A utilização dos gases combustos dentro do forno foi mais efetiva, sendo a secagem à temperatura de 150 °C por 30 horas a melhor opção para remoção de água da madeira.

Palavras – chave: Carvão vegetal. Energia térmica. Secagem artificial. Umidade

ABSTRACT

SIQUEIRA, Humberto Fauller, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April 2021. **Use of carbonization gases for wood drying inside the circular masonry kiln.** Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

In view of the energetic potential of the carbonization gases and the generation of thermal energy, the use of these can be an alternative to solve a major bottleneck in the production of charcoal, the drying of wood. Artificial drying of logs in the carbonization oven itself is an alternative compared to other drying methods, with the need for studies on technical aspects related to the efficiency of the drying process. The objective of this study was to evaluate the artificial drying of the wood inside the carbonization oven using, in the first stage, the carbonization gases and, in the second stage, the combustion gases of the burner at different temperatures and times for the drying of the round wood. To carry out the experiment, the furnace-furnace system was adapted to transport the gases to be used for drying. Eucalyptus wood was used to evaluate the drying of the wood inside the oven, which was characterized, determining the basic density; moisture content, dry basis, and C / A ratio. In the first part of the experiment, the carbonization gases, at the chimney outlet, were directed to the ovens that contained the wood to be dried. In the second part, the carbonization gases, first directed to the gas burner and after combustion, directed to the wood drying ovens. In the first part of the study, carbonization gases from the 1st, 2nd and 3rd phases were used; and in the second part of the experiment, he used the combustion gases from the burner, evaluating two temperatures (120 and 150 ° C) and four drying times (15, 22.5, 30, 45 and 60 hours). The drying of the wood inside the oven was carried out by arranging the wood in the same way as the carbonization oven, and before and after the drying process, the entire wood load was weighed. The moisture loss (%) and the drying rate (kg.h⁻¹) were calculated. It was concluded that only the gases from the 3rd phase of carbonization were effective for removing water from the wood due to the higher temperature and residence time, reducing the wood moisture by 12.51%. The use of combustion gases inside the oven was more effective, with drying at a temperature of 150 ° C for 30 hours the best option for removing water from the wood.

Keywords: Charcoal. Thermal energy. Artificial drying. Moisture

CAPÍTULO II

APROVEITAMENTO DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO PARA SECAGEM DA MADEIRA DENTRO DE FORNOS CIRCULARES DE ALVENARIA

1. INTRODUÇÃO

O setor de produção de carvão vegetal tem avançado cada vez mais no desenvolvimento de tecnologias que visam ao aumento da produção e de melhores condições de trabalho e aproveitamento energético dos produtos e coprodutos do processo de carbonização. Exemplo disso é a instrumentalização para monitoramento da temperatura da carbonização (CARVALHO et al., 2012; DAMÁSIO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2020), que proporciona aumento do rendimento da conversão. Além disso, o desenvolvimento de queimadores de gases que permitem melhores condições de trabalho nas unidades produtoras de carvão vegetal (CARDOSO et al., 2010; DONATO, 2017), reduz as emissões e ainda possibilita o uso da energia térmica resultante do processo de queima dos gases para secagem da madeira.

Os gases da carbonização, em determinadas fases do processo, são formados por compostos combustíveis, por exemplo, metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (C_nH_m), hidrogênio (H_2) e os gases condensáveis (alcatrão e licor pirolenhoso). A queima destes resulta na conversão dos gases de efeito estufa em dióxido de carbono (CO_2), água e calor (temperatura $> 500\text{ }^\circ\text{C}$) (DONATO, 2017). No cenário atual, as unidades produtoras de carvão vegetal que realizam a queima dos gases, não fazem seu aproveitamento, liberando essa energia térmica para a atmosfera. Neste sentido, o aproveitamento energético deste coproduto da carbonização para secagem artificial da madeira solucionaria um dos maiores gargalos relacionados à utilização da madeira para fins energéticos.

A secagem artificial utilizando os gases da carbonização é uma alternativa que objetiva reduzir o tempo de secagem ao ar livre e evitar perda de qualidade causada pelo longo período de estocagem da madeira no campo. Estudos que utilizaram os gases combustos do queimador para secagem da madeira via secadores evidenciaram sua viabilidade técnica, reduzindo, em média, 36,45% do teor de umidade inicial da madeira (CARDOSO, 2015). No entanto, a

viabilidade econômica e operacional deste método tem impedido a sua implantação, uma vez que os custos com investimento em infraestrutura, movimentação de madeira na unidade produtora e energia elétrica têm se mostrado altos.

Apesar dos diversos estudos realizados sobre secagem artificial para madeiras serradas, em lâminas ou partículas, não há na literatura estudos sobre secagem artificial da madeira dentro do próprio forno de carbonização, evidenciando a necessidade de desenvolvimento, bem como validação deste método. Alguns gargalos precisam ser solucionados, principalmente no que tange os parâmetros operacionais, tais como temperatura e tempo de secagem, de modo, a obter a melhor relação custo/benefício da implantação do sistema artificial de secagem aproveitando os gases da carbonização.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a eficiência da secagem artificial da madeira dentro do forno de carbonização utilizando, em primeira etapa, os gases da carbonização e, em segunda etapa, os gases combustos do queimador em diferentes temperaturas e tempos de secagem.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- ✓ Obter o perfil térmico do sistema de transporte dos gases da carbonização e dos gases combustos do queimador até o forno utilizado para secagem da madeira;
- ✓ Obter o perfil térmico do forno de secagem da madeira;
- ✓ Determinar, em primeira etapa, qual a fase da carbonização e, em segunda etapa, qual melhor tempo e temperatura de secagem da madeira dentro do forno;
- ✓ Avaliar a massa de água eliminada durante cada procedimento operacional de secagem da madeira em função da carga total utilizada, posição da tora dentro do forno e ao longo da tora e;
- ✓ Determinar a perda de umidade e taxa de secagem da madeira dentro do forno.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa em parceria com a empresa ArcelorMittal Brasil S.A.

3.1. Obtenção e caracterização da madeira

A madeira utilizada foi do gênero *Eucalyptus* sp., fornecidas pela empresa parceira do estudo, provenientes de plantios com 7 anos de idade. As toras foram seccionadas com comprimento médio de 2 metros, em seguida, foram novamente seccionadas, em toras de comprimento médio de 1 metro, de acordo com a altura da parede do forno utilizado para realização do experimento. Para fins de homogeneização da carga de madeira, definiram-se três centros de classes de diâmetro: 9 centímetros, 12 centímetros e 15 centímetros com amplitude de ± 3 centímetros.

As propriedades da madeira foram determinadas selecionando 12 toras por classe de diâmetro, retirando discos de 5 cm de espessura, nas posições 25, 50 e 75% do comprimento total de cada tora. A determinação da relação cerne/alburno (C/A) foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Evangelista (2007), obtida pela equação 1:

$$\frac{C}{A} = \frac{Dc^2}{D^2 - Dc^2} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: Dc - Diâmetro do cerne, em cm; D - Diâmetro do disco sem casca, em cm.

Depois de obter a relação cerne/alburno de cada disco de madeira, retiraram-se duas cunhas opostas, passando pela medula, para determinação da densidade básica, de acordo com a NBR 11.941 (ABNT, 2003).

Para a determinação da composição química estrutural da madeira, utilizou-se a fração da serragem que passou pela peneira com malha de 40 *mesh* e ficou retida na peneira com malha de 60 *mesh* (ASTM, 1982). O teor de umidade, absolutamente seco, da madeira foi obtido conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998). Em duplicatas, determinou-se também o teor de extrativos da madeira de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), havendo substituição do etanol/benzeno por etanol/tolueno.

A partir do método Klason modificado foi obtido o teor de lignina insolúvel, de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). Já a lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971). Para o teor de lignina total, os valores de lignina solúvel e insolúvel foram somados. O teor de holocelulose foi obtido pelo somatório dos teores de extrativos e lignina totais, decrescido de 100.

A porcentagem de cinzas na madeira foi determinada de acordo com NBR 8112 (ABNT, 1986), substituindo-se o cadinho de platina por cadinho de porcelana e a temperatura de 750 °C para 600 °C, conforme Pereira (2012).

Para determinar a permeabilidade, foram retiradas, a partir dos toretes, amostras retangulares (30 x 3 x 3 cm) para torneamento até que atingissem 2 cm de diâmetro e seccionadas com 5 cm de comprimento de acordo com a metodologia de Teixeira (2015) adaptada de Baraúna (2009). A superfície longitudinal dos corpos de provas foram impermeabilizados com parafina, no sentido radial, a fim de evitar a passagem de ar que comprometeriam as medições, enquanto as extremidades foram isoladas com fita adesiva para não entrarem em contato com a parafina, mantendo-se livre a área do fluxo de ar atmosférico. Retiraram-se amostras das regiões do cerne e cerne periférico para determinação de suas permeabilidades, visto que houve dificuldade para a retirada de amostras individualizadas de alburno.

O equipamento para o ensaio da permeabilidade possui quatro fluxômetros em série (0,04 a 0,5 litros/minuto lpm; 0,2 a 2,5 lpm; 0,4 a 5,0 lpm e 2,0 a 25,0 lpm), que se conectam através de mangueiras de PVC. Na extremidade de uma das mangueiras está conectada uma bomba a vácuo e, na extremidade da outra mangueira, as amostras foram encaixadas para medição. O vácuo aplicado foi de -3 pol.Hg após o acionamento da bomba e aguardou-se um período de, aproximadamente, 10 segundos para estabilização do fluxo e coleta dos dados de vazão após a passagem do fluxo de ar no corpo-de-prova e a pressão de saída indicada pela bomba de vácuo. A determinação do coeficiente de permeabilidade ao gás foi obtida de acordo com a equação 2:

$$Kg = \frac{V.L.Pi}{t.A.\Delta P.Pm} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: Kg: coeficiente de permeabilidade ao gás (cm³/cm.atm.s); Q: volume do fluxo de gás que percorre o corpo de prova (cm³/s); L: comprimento da amostra (cm); Pi: pressão de entrada, a do

ambiente (atm); t: tempo (s); A: área da seção transversal (cm²); ΔP : diferença de pressão (atm); e P_m : média da pressão no corpo-de-prova (atm).

O teor de umidade médio, em base seca, das madeiras utilizadas nos experimentos, foi obtido a partir de três toras, por classe de diâmetro, totalizando 9 toras de madeira por enforamento. Das toras de madeira, retirou-se três discos, com 5 cm de espessura, a 25, 50 e 75% do comprimento total. O teor de umidade foi determinado de acordo com a NBR 14.929 (ABNT, 2017).

3.2. Construção do Sistema Fornos-Fornalha

As atividades de carbonização e secagem da madeira dentro do forno foram realizadas no sistema fornos-fornalha, que consistiu em um conjunto de quatro fornos circulares acoplados a um queimador de gases central, interligados por meio de dutos. Cada forno possuía capacidade volumétrica de 1,4 st, aproximadamente 1 m³ de madeira e foi construído com tijolos cerâmicos maciços, assentados com argamassa de barro. As dimensões internas de cada forno eram de 1,20 metros de diâmetro; paredes com 1,00 metro de altura e flecha de copa de 0,40 metros. Ao nível do solo e do piso, foram feitas quatro aberturas (controladores de ar), cujas dimensões foram de 5 x 5 centímetros, distribuídas uniformemente no perímetro do forno para admissão de ar.

A porta do forno foi construída em formato retangular, com 60 centímetros de largura por 100 centímetros de altura. Na parte superior, um vergalhão em aço foi fixado para dar suporte à copa e garantir maior durabilidade do forno. Foi instalada uma cinta metálica de 3/8 de polegada ao redor do forno, externamente, na primeira fileira de tijolos da copa, para garantir melhor estabilidade do forno perante pressões internas dos gases durante a carbonização. Na parte oposta à porta, uma abertura de 15 x 15 cm foi deixada para remoção dos gases da carbonização.

Em cada forno foram instalados três poços metálicos (tubos metálicos com fundo fechado) para coleta de temperatura: um foi instalado na copa, a 1,10 metros, e dois laterais, a 50 centímetros em relação ao solo, sendo um no centro do forno, entre os controladores de ar, e outro próximo à saída dos gases. O monitoramento e coleta da temperatura foram realizados utilizando sensor infravermelho de temperatura, pirômetro da marca Minipa, modelo “MT-350”, com intervalo de medição de -50 °C a 550 °C.

Na primeira parte do experimento, foram utilizados apenas dois fornos, sendo um para as carbonizações e fornecimento dos gases para realização da secagem e outro para enforamento e secagem da madeira. Dessa forma, construiu-se uma chaminé em cada forno com 1,60 metros de altura, e área interna de 225 cm² (15 x 15 cm), para remoção dos gases da carbonização e dos gases resultantes do processo de secagem (Figura 1).

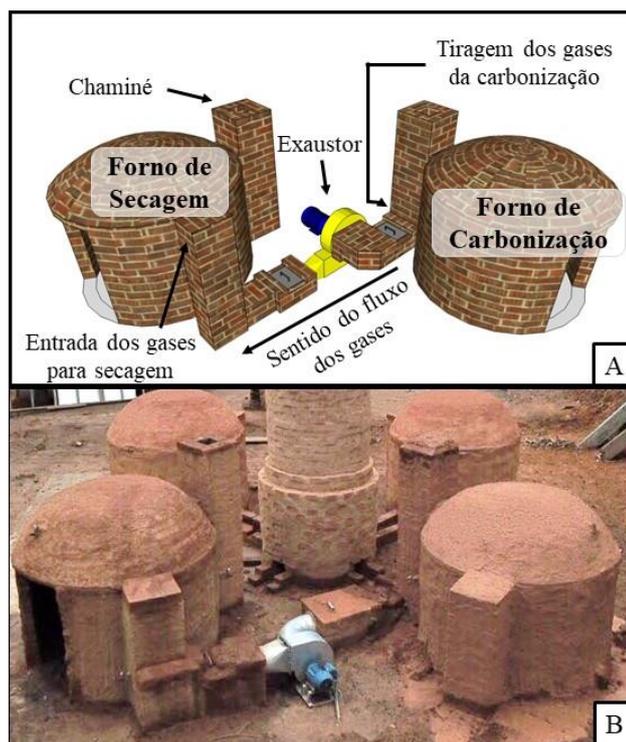


Figura 1 – (A) Representação esquemática do sistema para condução de gases da carbonização. (B) Implantação do sistema para condução de gases da carbonização.

Na segunda parte do experimento, os quatro fornos foram utilizados, sendo dois para as carbonizações, fornecimento dos gases para o queimador e posterior utilização dos gases combustos. Os outros dois fornos foram utilizados para enforamento e secagem da madeira. Foram construídos dutos de transporte dos gases da carbonização até a fornalha e da fornalha até o forno de secagem (Figura 2).

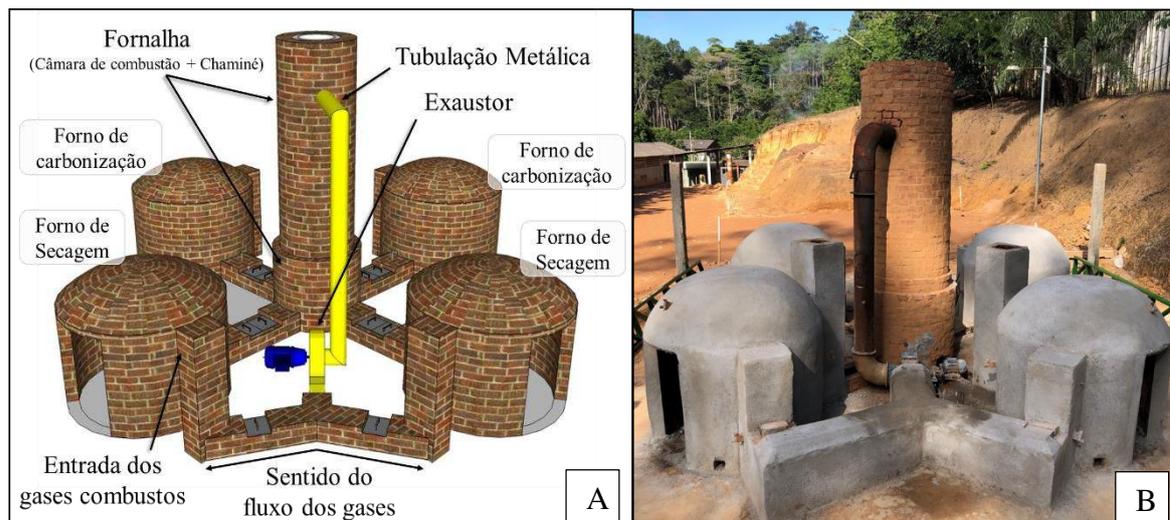


Figura 2 – (A) Representação esquemática do sistema para condução de gases combustos do queimador. (B) Implantação do sistema para condução de gases combustos do queimador.

Os dutos de transporte dos gases da carbonização até a fornalha foram construídos com tijolos cerâmicos maciços e assentados com argamassa de barro. Foram feitos 4 dutos conectando os fornos à fornalha, com dimensões internas de 15 cm de altura por 15 cm de largura e 85 cm de comprimento. Instalou-se uma válvula borboleta para controle da vazão dos gases da carbonização para fornalha, operada manualmente, instalada no centro do duto a 60 cm da parede do forno.

A fornalha para queima dos gases da carbonização é composta por câmara de combustão e chaminé. A câmara de combustão foi construída com tijolos maciços cerâmicos e uma mistura de argamassa de argila, açúcar e cimento, com parede dupla (20 cm), em formato cilíndrico, com dimensões internas de 75 cm de altura e 65 cm de diâmetro. Além disso, a câmara de combustão foi revestida internamente com manta cerâmica para melhorar o isolamento térmico.

A manta cerâmica utilizada tinha espessura média de 5,08cm, sendo constituída de Al_2O_3 (52 a 54%), SiO_2 (44 a 48%) Fe_2O_3 (0,1 a 0,2%), TiO_2 (0,1 a 0,2%). Sua fixação foi realizada no interior da fornalha por meio de pinos metálicos em formato “L”. Esta manta suporta temperatura máxima de 1.482 °C, aumentando a eficiência do processo de combustão e vida útil da fornalha.

Na lateral da câmara de combustão foi instalada uma janela basculante com dimensões de 40 x 40 cm para ignição, alimentação de combustível auxiliar e manutenção. No centro da base da fornalha foi instalada uma grelha metálica de 15 x 15 cm, responsável pela admissão

de ar para o interior da câmara de combustão advindo de um duto subterrâneo de 15 x 15 cm de altura e largura e 75 cm de comprimento.

Acima da câmara de combustão, antes da chaminé, foi feito um estrangulamento com tijolos, reduzindo o diâmetro interno para 35 cm, com objetivo de aumentar o tempo de residência dos gases na câmara, e, logo acima, iniciou-se a construção da chaminé, com diâmetro interno de 50 cm.

A chaminé foi construída em alvenaria, com material idêntico ao utilizado para construção da câmara de combustão, em parede dupla e revestida internamente com manta cerâmica. A altura final da chaminé foi de dois metros de altura, acima da câmara de combustão.

3.3. Descrição do sistema de transporte dos gases para realização da secagem

Conforme mencionado, o trabalho foi dividido em duas etapas executadas de forma consecutiva. Neste sentido, após a execução da primeira etapa, o sistema foi reestruturado para adequação ao proposto para segunda etapa do trabalho.

3.3.1. Sistema de transporte dos gases da 1ª Etapa

Os gases gerados durante a carbonização foram succionados por um ventilador centrífugo e direcionados, por dutos, até o forno de secagem. O duto foi construído com tijolos cerâmicos maciços, com dimensões internas de 15 cm de largura e 15 cm de altura. Ao duto foi conectado um ventilador centrífugo de 0,5 cv de potência e 1800 rpm, utilizado para succionar os gases da carbonização e conduzi-los até o forno de secagem.

No mesmo ventilador foi conectado outro duto para direcionamento dos gases da carbonização, com as mesmas características já descritas, conectando-o ao forno de secagem. Neste duto instalou-se um poço metálico próximo ao local de inserção dos gases da carbonização no forno de secagem, idêntico ao instalado nos fornos de carbonização para monitoramento e coleta de temperatura.

No forno de secagem, posicionada lateralmente, abaixo da copa, uma abertura com área interna de 225 cm² (15x15 cm) foi feita para inserção dos gases da carbonização. Após a entrada destes no forno de secagem, o mesmo permeava a carga de madeira e, logo em seguida,

devido à pressão positiva exercida pelo ventilador, os gases residuais eram lançados à atmosfera por meio da chaminé do forno de secagem

Na figura 3 observa-se uma representação geral do procedimento de secagem artificial da madeira dentro do forno utilizando os gases da carbonização. O procedimento operacional foi dividido em 6 etapas, sendo elas: pesagem inicial da madeira, carregamento do forno, fechamento de portas, ignição nos fornos de carbonização, execução da secagem artificial e pesagem da madeira pós-secagem.



Figura 3 – Fluxograma da 1ª Etapa do experimento – Secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases da carbonização.

3.3.2. Sistema de transporte dos gases da 2ª etapa

Na segunda parte do estudo modificou-se o sistema de transporte dos gases para utilizar os gases combustos do queimador. A partir de um ventilador centrífugo e tubulações metálicas, os gases eram succionados na chaminé e direcionados ao forno de secagem por meio de dutos de alvenaria.

A remoção dos gases combustos foi feita na chaminé, a 2,10 metros acima da base da fornalha, sendo eles conduzidos por meio de tubulação metálica de 2 mm de espessura, diâmetro interno de 180 mm e 1,90 metros de comprimento. Nessa mesma tubulação foi instalada uma válvula de segurança, tipo borboleta, para interromper o fluxo de gases combustos, caso necessário, como medida de segurança. Abaixo desta válvula, a 1,5 metros do piso, instalou-se também um *damp*er (abertura de 12 x 20 cm) com acionamento manual de fechamento para controle da temperatura do gás combusto na entrada do forno de secagem.

Esta tubulação foi conectada a um ventilador centrífugo idêntico ao utilizado na primeira parte. Na saída do ventilador foi conectado um duto em formato “Y”, construído com tijolos maciços e argamassa de barro, com seção quadrangular (15x15 cm) direcionando os gases combustos até os fornos de secagem.

O local de injeção dos gases combustos foi o mesmo utilizado na primeira parte do estudo, ou seja, a partir da abertura (15x15cm) feita na parede lateral do forno. O controle da temperatura dos gases combustos foi realizado no local de sua entrada no forno de secagem, por meio de termopares tipo “K” e *datalogger* ICEL, modelo TD-880. Os gases combustos, após permearem a carga de madeira do forno de secagem, foram lançados à atmosfera pela chaminé devido à pressão positiva exercida pelo ventilador centrífugo.

Na figura 4 observa-se uma representação geral do procedimento de secagem artificial da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos. O procedimento operacional foi dividido em 6 etapas, sendo iniciado pela pesagem da madeira, carregamento do forno, fechamento de portas, ignição (1º - fornalha e 2º - fornos de carbonização), execução da secagem artificial e pesagem da madeira pós-secagem.

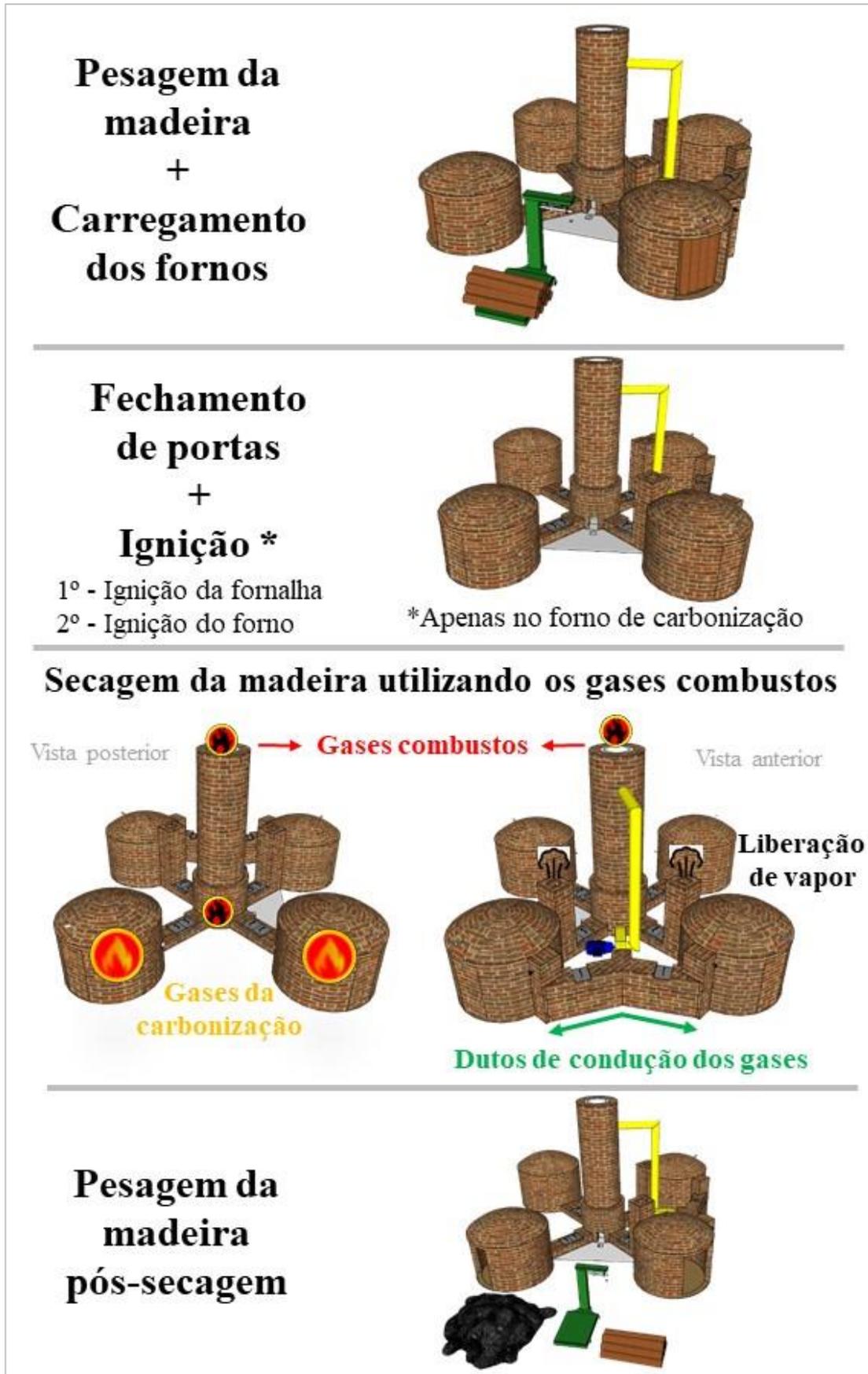


Figura 4 – Fluxograma da 2ª Etapa do experimento – Secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases combusto.

3.4. Carbonização da madeira

Para obtenção dos gases de carbonização e para execução da primeira e segunda parte, foram realizadas carbonizações pelo método convencional. Antes do carregamento da madeira, esta foi totalmente pesada para obtenção do rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

O carregamento da madeira foi realizado manualmente, com seu arranjo na posição vertical até um metro de altura, e, no volume restante da copa do forno, esta foi posicionada na horizontal, no sentido porta-fundo. Realizou-se a separação por classe de diâmetro, sendo utilizadas, nas regiões próximas aos controladores de ar, madeiras mais grossas ($15\text{ cm} \pm 3$), no centro do forno, mais finas ($9\text{ cm} \pm 3$), e nas demais regiões, colocou-se madeiras da classe de $12\text{ cm} \pm 3$.

Após o carregamento, a porta foi fechada com tijolos cerâmicos maciços, assentados com argamassa de barro, deixando duas aberturas centralizadas, sendo uma superior e uma inferior, para ignição do forno. A ignição foi realizada por meio da queima de resíduos lignocelulósicos na abertura superior da porta, e após consolidada a ignição, a abertura foi fechada.

Na segunda parte do estudo, procedeu-se à ignição da fornalha utilizando também resíduos lignocelulósicos e, somente depois deste procedimento, realizou-se a ignição dos fornos. A condução da carbonização, tanto para primeira quanto para a segunda parte do experimento, foi realizada a partir de uma curva teórica de carbonização ajustada para o sistema fornos-fornalha, conforme figura 5.

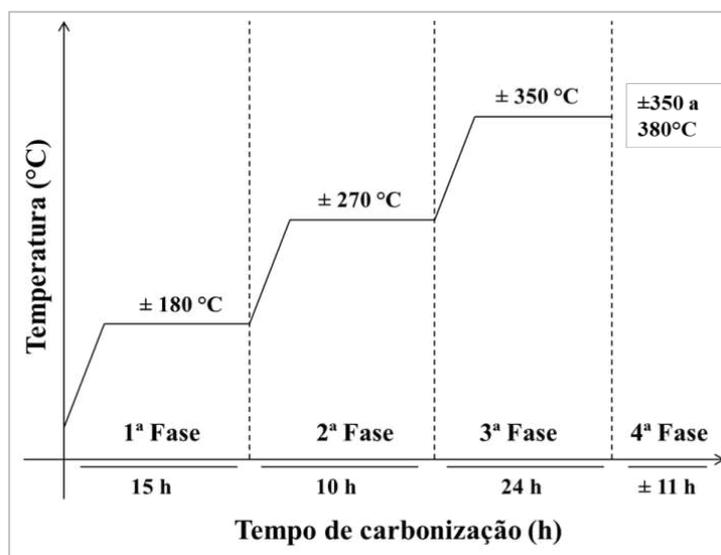


Figura 5 – Curva teórica de carbonização da madeira.

O monitoramento da temperatura do forno foi realizado com auxílio de pirômetro e o controle da temperatura realizado a partir da abertura e fechamento dos controladores de ar. O término da carbonização foi determinado pela chegada de brasa (ou da frente de carbonização) nos últimos controladores de ar, localizados próximos à saída de gases.

Além disso, observou-se a redução do volume de gases e, por fim, foi introduzido o vergalhão, na parte inferior do forno, para verificar a altura de atíços dentro do mesmo. Após esse procedimento, os controladores de ar foram fechados com argamassa de barro. Foram também fechados a chaminé, durante a primeira parte do estudo, e o duto de condução dos gases da carbonização para a fornalha, durante a segunda parte.

3.5. Perfil térmico do sistema de secagem

No procedimento de secagem da madeira dentro do forno foram monitoradas, na primeira etapa, a temperatura na copa do forno de carbonização, temperatura dos gases da carbonização na saída do forno, temperatura dos gases da carbonização na entrada do forno de secagem e temperatura na copa e parede do forno de secagem.

Na segunda etapa, monitorou-se a temperatura dos gases combustos no local de entrada do forno de secagem, além da temperatura na copa, parede e chaminé do forno de secagem.

As medições foram realizadas em intervalos regulares de 1 hora, do início ao término da carbonização e secagem. O monitoramento da temperatura foi realizado utilizando sensor infravermelho e pirômetro, da marca Minipa, modelo “MT-350, com intervalo de medição de 30 °C a 550 °C. No sistema de transporte dos gases combustos, utilizou-se termopares, tipo “K” e *datalogger* da marca ICEL, modelo TD-880. A partir dos dados coletados obteve-se o perfil térmico do sistema de transporte dos gases e secagem da madeira dentro do forno em função de cada tratamento executado.

3.6. Secagem artificial da madeira dentro do forno

Para avaliar a secagem artificial da madeira dentro do forno, foram realizados três procedimentos de amostragem para verificar a homogeneidade da secagem, sendo eles: secagem por carga total de madeira enforada, secagem por posição no forno e secagem por posição na tora.

3.6.1. Secagem por carga total de madeira

Para avaliar a secagem por carga total, inicialmente a madeira foi seccionada para adequação do seu comprimento ao tamanho do forno. Em seguida, a carga total de madeira foi pesada juntamente com a madeira acomodada na copa do forno e enforcada (Figura 6).

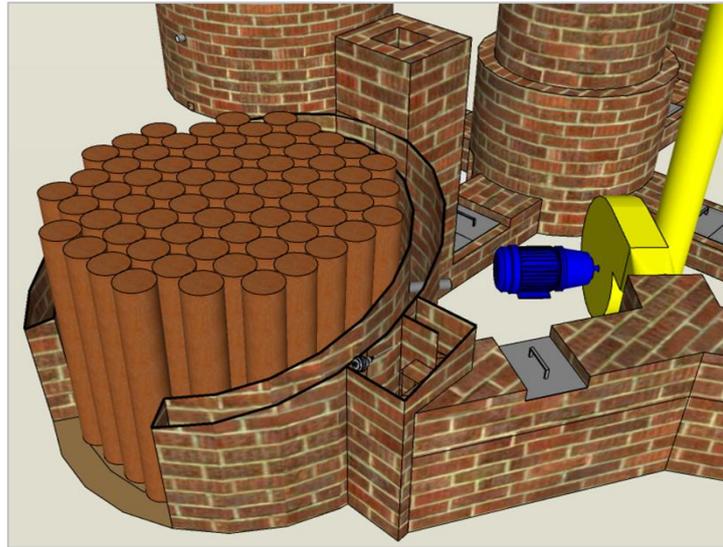


Figura 6 – Representação esquemática da carga total de madeira enforcada no forno de secagem.

3.6.2. Secagem por posição no forno

Para avaliar a secagem da madeira por posição no forno, estabeleceram-se cinco posições: porta (P); lado direito (LD); centro (C); lado esquerdo (LE) e fundo (F). Para cada posição, amostrou-se 3 toras-controle da classe diamétrica de 12 cm provenientes da carga total de madeira enforcada, sendo cada tora-controle pesada individualmente, em momento anterior ao processo de secagem, e enforcada juntamente com a carga de madeira total do forno (Figura 7).

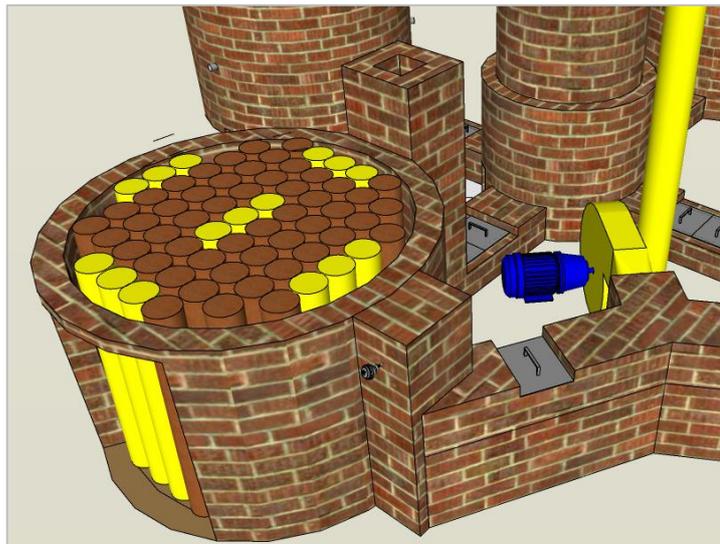


Figura 7 – Disposição das toras controle no forno de secagem.

Após o arranjo das toras-controle nas posições pré-definidas, prosseguiu-se com o fechamento da porta com tijolo, argamassa argilosa, iniciando-se o procedimento de secagem da madeira dentro do forno.

3.6.3. Secagem por posição na tora-controle

Após o procedimento de secagem, a porta foi desconstruída, sendo novamente realizada a pesagem de toda a carga de madeira. As toras controles (definidas nas posições do forno) foram pesadas individualmente e, em seguida, retirados discos a 25%, 50% e 75% da sua altura, objetivando avaliar a secagem no sentido base, centro e topo (Figura 8).

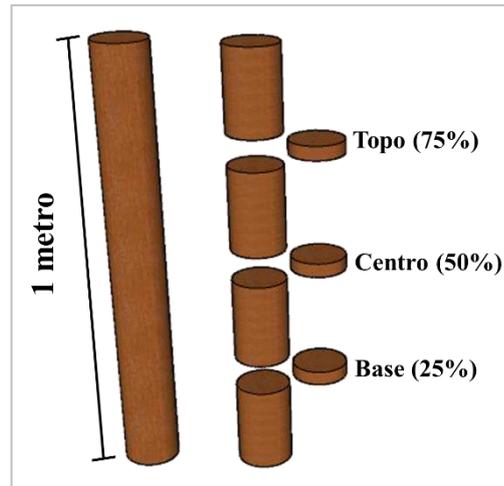


Figura 8 – Representação esquemática da retirada dos discos da tora controle na base, centro e topo.

Os discos amostrados foram submetidos ao procedimento de análise do teor de umidade, base seca, conforme NBR 14.928 (ABNT, 2017).

3.7. Eficiência e taxa de secagem da madeira dentro do forno

A eficiência de secagem da madeira dentro do forno foi determinada considerando a redução do teor de umidade inicial da madeira e a taxa de secagem. Estes parâmetros foram obtidos por meio dos dados coletados na pesagem inicial e final das três amostragens realizadas para avaliar a secagem artificial da madeira. A massa total de água removida foi obtida realizando a pesagem de toda carga antes e após o teste de secagem dentro do forno. Após a obtenção das massas iniciais e finais de cada tora-controle e da carga total de madeira enfornada, determinou-se a perda de umidade, em base seca, e a taxa de secagem, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de secagem obtidos após a realização dos tratamentos

Parâmetros da secagem	Equações
Perda de umidade, base seca (%)	$Perda\ de\ UBS(\%) = UBS_{pós\ secagem} - UBS_{inicial}$
Taxa de secagem (kg/h)	$Taxa\ de\ secagem\left(\frac{kg}{h}\right) = \frac{(Mi - Mf)}{t}$

UBS_{pós-secagem}: teor de umidade, base seca (%) após a secagem da madeira; UBS_{inicial}: teor de umidade, base seca (%) antes da secagem da madeira; Mi: massa inicial (kg) ; Mf: massa pós secagem da madeira (kg); t: tempo (h).

3.8. Delineamento experimental

O desenvolvimento deste estudo foi dividido em duas etapas, sendo a primeira secagem dentro do forno utilizando os gases da carbonização, e a segunda secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador (Tabela 2).

Tabela 2 – Delineamento experimental

Experimento	Fase/Temperatura de Secagem	Tempo de Secagem (horas)
1ª Etapa	Gases da 1ª fase de carbonização	15
	Gases da 2ª fase de carbonização	10
	Gases da 3ª fase de carbonização	24
2ª Etapa	120 °C	15
		22,5
		30
	150 °C	45
		60
		15
	150 °C	22,5
		30
		45
		60

3.8.1. Secagem dentro do forno utilizando os gases da carbonização

Na primeira etapa, o delineamento aplicado à análise da secagem por carga total de madeira dentro do forno foi um delineamento inteiramente casualizado (DIC) com 3 fases da carbonização. Com a obtenção dos dados, realizou-se inicialmente o teste de *Shapiro-Wilk*, para testar a normalidade, e *Bartlett*, para testar a homogeneidade das variâncias. Em seguida, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em nível de 5% de significância, para avaliar diferenças significativas entre os tratamentos. Quando observada diferença significativa entre os tratamentos, estes foram submetidos ao teste de médias, pelo Teste de Tukey, em nível de 95% de probabilidade.

3.8.2. Secagem dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador

Na segunda etapa, para a análise da secagem da carga total de madeira no forno, foi aplicado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) em arranjo fatorial com 2

temperaturas (120 e 150 °C) e 5 tempos de secagem (15; 22,5; 30; 45 e 60 horas), representando 10 tratamentos com 2 repetições, totalizando 20 unidades amostrais.

Para avaliar a secagem da madeira por posição no forno, isolou-se as temperaturas, aplicando um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial com 5 posições (porta, lado direito, centro, lado esquerdo e fundo) e 5 tempos de secagem (15; 22,5; 30; 45 e 60 horas), representando 25 tratamentos com 3 repetições, totalizando 75 unidades amostrais.

Os dados foram submetidos, inicialmente, ao teste de *Shapiro-Wilk*, para testar a normalidade, e ao *Bartlett*, para testar a homogeneidade das variâncias. Em seguida aplicou-se análise de variância (ANOVA) em nível de 5% de significância, para avaliar diferenças significativas entre os tratamentos. Quando estabelecidas diferenças significativas, aplicou-se o teste de Tukey, a 5% de nível de significância.

Para avaliar a secagem da madeira na tora-controle, isolou-se as temperaturas, aplicando um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial triplo com 5 posições (porta, lado direito, centro, lado esquerdo e fundo), 5 tempos de secagem (15; 22,5; 30; 45 e 60 horas) e 3 posições na tora (base, centro e topo), representando 75 tratamentos com 3 repetições, totalizando 225 unidades amostrais.

Para melhor visualização dos resultados, foi realizada análise das superfícies de resposta, que consiste em uma observação espacial por meio do método de interpolação *IDW* (*Inverse Distance Weighting* - Ponderação do Inverso das Distâncias). Foram avaliados apenas os efeitos das diferentes temperaturas e tempos de secagem na perda de umidade. As coordenadas X e Y foram definidas conforme as posições no forno (Figura 9 – I), sendo que para cada altura do forno (base, centro e topo) (Figura 9 – II), foi realizado um mapa temático (Figura X). As análises foram realizadas utilizando o software R (R CORE TEAM, 2017), através das funções “*krige*”, “*SpatialPoints*”, “*gridded*” dos pacotes “*sp*” e “*gstat*”.

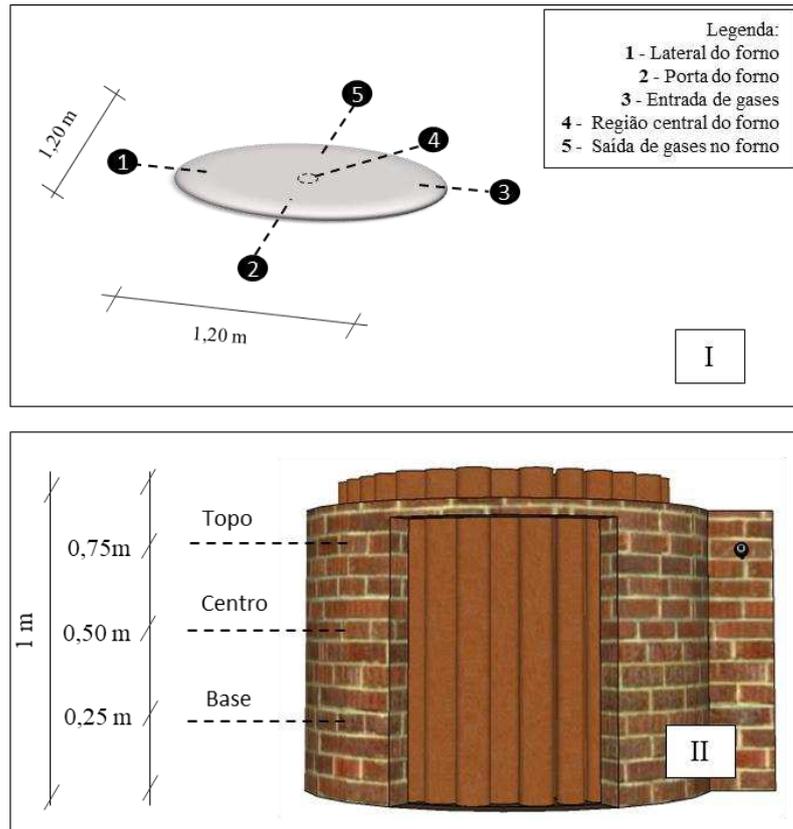


Figura 9 – Regionalização das coordenadas X e Y, de acordo a região do forno (I);
Definição das alturas do forno para confecção dos mapas temáticos (II).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Propriedades da madeira

A densidade básica média da madeira utilizada foi igual a $485,8 \text{ kg.m}^{-3}$ e relação C/A média de 0,88. Os valores médios de holocelulose (75,81 %), lignina total (21,66 %), extrativos totais (2,35 %) e cinzas (0,18 %) estão próximos aos observados na literatura para clones de *Eucalyptus sp.* destinados para fins energéticos (PEREIRA et al., 2013; ZANUNCIO et al., 2015; COSTA et al., 2017).

De acordo com Zanuncio et al. (2015), a densidade básica tem relação inversa com o teor de umidade inicial da madeira devido à maior quantidade de espaços vazios a serem preenchido com água livre (SKAAR, 1972). Entretanto, estes elementos facilitam o fluxo de água na madeira, resultando em maiores taxas de secagem. Neste sentido, de acordo com o observado neste estudo, esperam-se elevadas taxas de secagem da madeira.

Os teores médios de holocelulose (celulose e hemiceluloses) e lignina implicam diretamente na relação água x madeira. Segundo Christensen e Kelsey (1959), a maioria dos locais de sorção da madeira é encontrada nas hemiceluloses, seguida pela celulose e, por fim, pela lignina.

A celulose, por ser o principal componente químico da madeira, é agregada em microfibrilas por meio de ligações hidroxilas (OH), sendo dois terços dos grupos hidroxilas presentes entre e dentro das cadeias de celulose. Os grupos hidroxilas dentro da cadeia são inacessíveis, enquanto os da superfície são possíveis locais de sorção, influenciando o teor de umidade da madeira, especialmente, no ponto de saturação das fibras (HOFSTETTER et al., 2006).

Os valores médios de permeabilidade foram $181,87 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ e $11,34 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ para alburno e cerne, respectivamente. Nota-se que a região do alburno é 16 vezes mais permeável quando comparado à região do cerne. Neste sentido, do ponto de vista da secagem da madeira, é desejável que se tenha menor relação cerne/alburno, corroborando para secagem mais rápida.

Os teores médios de umidade da madeira utilizada no experimento variaram entre 38,45% e 70,59%. A grande variação se deve ao longo período de realização do experimento e por fatores climáticos, como a chuva. Além disso, optou-se por avaliar a secagem artificial em toras com teor de umidade variando entre 40% e 70% devido à redução na taxa de secagem quando a madeira atinge esta faixa de umidade (REZENDE et al., 2010).

4.2. Perfil térmico do processo de secagem da madeira dentro do forno

4.2.1. Secagem artificial da madeira dentro do forno utilizando os gases da carbonização 1ª etapa

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de temperatura no forno de carbonização, responsável pelo fornecimento dos gases para secagem da madeira dentro do forno em função dos tratamentos avaliados na 1ª etapa do estudo.

Tabela 3 – Valores médios de temperatura no forno de carbonização em função dos tratamentos de secagem na 1ª etapa

Tratamento	Temperatura (°C)
-------------------	-------------------------

	Tempo de secagem (h)	Copa do forno de carbonização	Saída dos gases da carbonização*
Gases da 1ª fase	15	231 ⁽¹⁸⁰⁾	39
Gases da 2ª fase	10	239 ⁽²⁷⁰⁾	49
Gases da 3ª fase	24	344 ⁽³⁵⁰⁾	66

*temperatura coletada no duto de transporte dos gases, após a saída do forno de carbonização e antes do ventilador centrífugo; ^() temperatura estabelecida pela curva teórica de carbonização (Figura 5).

Observando os valores médios de temperatura dos tratamentos utilizando os gases da 1ª fase da carbonização (15 horas), nota-se que a temperatura na copa do forno esteve acima da temperatura teórica estipulada para o processo, mesmo com todos os controladores de ar do forno de carbonização estando completamente vedados. Isto ocorreu devido à excessiva tiragem dos gases pela chaminé, dificultando o controle da temperatura.

Além disso, a 1ª fase da carbonização é iniciada com a ignição do forno e há ocorrência de zonas de combustão que, juntamente com a sucção causada pelo exaustor na tiragem dos gases, interferem também sobre o controle da temperatura. Este comportamento ocorre devido à estrutura do forno ser de alvenaria, ocorrendo entrada de ar indevida por fissuras na argamassa da parede, copa e controladores de ar.

As temperaturas na copa do forno de carbonização dos demais tratamentos, utilizando os gases da 2ª e 3ª fase da carbonização, ficaram próximas às estabelecidas pela curva teórica, ou seja, 270 °C e 350 °C, respectivamente. Isto evidencia que, com o uso dos gases da carbonização em fases posteriores à inicial, o sistema está em equilíbrio tanto nos aspectos operacionais, devido à extinção das zonas de combustão, quanto nos aspectos estruturais, quando as paredes e piso do forno encontram-se aquecidos e com menor dilatação térmica.

Em relação à temperatura de saída dos gases do forno de carbonização, foi observada menor temperatura para os tratamentos utilizando os gases da fase endotérmica (1ª e 2ª fase da carbonização). As diferenças de temperatura observada para os gases da 3ª fase de carbonização foram de 41% e 25,7%, respectivamente. Estas diferenças podem ser associadas à curva teórica estabelecida para carbonização e pelas interações entre a estrutura do forno, a carga de madeira em carbonização e os gases da carbonização.

Devido às menores temperaturas nas fases iniciais da carbonização, é de se esperar menores temperaturas dos gases resultantes do processo. Em conjunto, a troca de calor entre os gases da carbonização e a carga de madeira enfiada, a estrutura do forno (tijolos e argamassa) e suas respectivas trocas de calor com o ambiente, implicam na redução da temperatura. Além disso, há perdas térmicas no caminho a ser percorrido pelos gases até os

fornos de secagem, por conta da estrutura em alvenaria dos dutos e da estrutura metálica do ventilador centrífugo.

Na Figura 10 são apresentados os perfis de temperatura do sistema de secagem da madeira dentro do forno na primeira etapa do estudo, ou seja, utilizando os gases da carbonização.

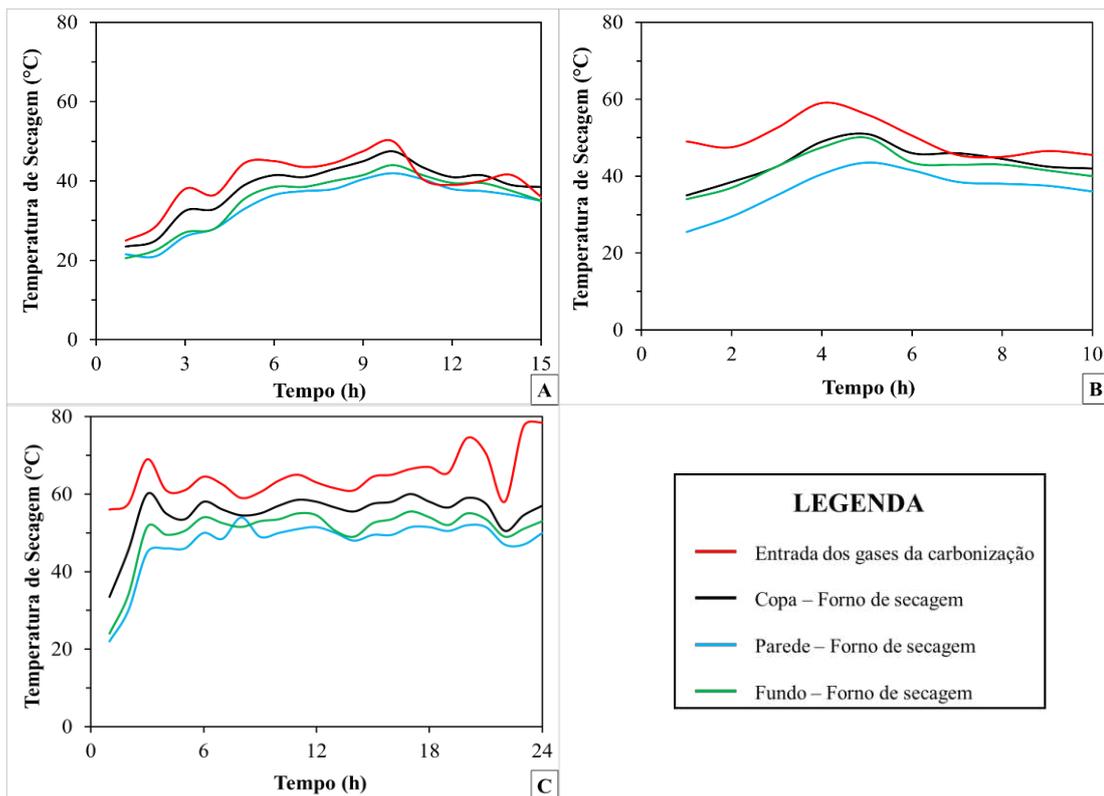


Figura 10 – Perfil térmico da secagem dentro do forno utilizando, na primeira etapa, os gases da carbonização. (A) gases da 1ª fase da carbonização, (B) gases da 2ª fase da carbonização e (C) gases da 3ª fase da carbonização.

De maneira geral, para a temperatura de entrada dos gases no forno de secagem, houve uma redução de 1,7; 6,0 e 9,5 °C quando comparado à temperatura na copa do forno de secagem durante os tratamentos avaliando os gases da 1ª, 2ª e 3ª fase da carbonização, respectivamente. A redução da temperatura dos gases ao entrarem no forno de secagem se deve à perda de carga pelas paredes e piso do forno e, principalmente, pela massa de madeira enfiada.

Já no forno de secagem, outro fator comum observado nos tratamentos avaliados na 1ª etapa do estudo, foi as diferenças de temperatura no forno de secagem. A região com maior temperatura foi observada na copa do forno devido à massa de ar quente possuir menor densidade, concentrando-se em sua região superior. Já a menor temperatura foi observada na

parede do forno, localizada do lado oposto à entrada dos gases da carbonização, ocorrendo devido à permeabilidade dos gases na carga de madeira e trocas térmicas ao longo da secagem. Temperaturas intermediárias foram observadas no fundo do forno, uma vez que é o local de saída dos gases, indicando a ocorrência de caminhos preferenciais no fluxo de gases em seu interior, impedindo a distribuição homogênea deste.

Em relação aos tratamentos utilizando os gases da 1ª fase da carbonização, observa-se que, inicialmente, há diferença entre as temperaturas de entrada dos gases da carbonização e temperaturas do forno de secagem. No entanto, após 10 horas de secagem, essas diferenças foram reduzidas, indicando equilíbrio entre a temperatura dos gases da carbonização e regiões do forno de secagem. Vale ressaltar que, para este tratamento, os picos de temperatura dentro do forno de secagem não ultrapassaram 50 °C, e apresentaram valor médio de 38,3 °C.

O tratamento utilizando os gases da 2ª fase da carbonização apresentou comportamento semelhante ao citado anteriormente, no entanto, devido à maior temperatura de entrada dos gases da carbonização, após 5 horas de secagem, foi observada menor diferença entre as temperaturas para cada região do forno. A temperatura na copa e fundo do forno de secagem permaneceu próxima do início ao fim do experimento, apresentando uma diferença média de 1,5 °C, demonstrando distribuição homogênea do fluxo de calor nestas regiões.

As temperaturas observadas utilizando os gases da 3ª fase da carbonização foram superiores aos demais avaliados na 1ª etapa deste estudo. De modo geral, a temperatura de entrada dos gases da carbonização permaneceu acima de 60 °C, e na copa do forno de secagem a temperatura média foi 55,2 °C. A partir da 3ª hora de secagem, as temperaturas na parede e fundo do forno permaneceram próximas, com diferença média de 3 °C.

Em função das características da carbonização, por exemplo, elevada temperatura (≈ 350 °C), degradação das hemiceluloses, celulose e maior poder calorífico dos gases, os valores observados de temperatura foram superiores aos observados para os tratamentos utilizando os gases da fase endotérmica da carbonização. Segundo Costa et al. (2020), em faixas de temperaturas próximas de 300 °C há incremento na temperatura e vazão dos gases, por consequência, aumento das emissões dos gases da carbonização.

Na Figura 11 observam-se, pelo mapa térmico, que há perda de temperatura do gás durante seu transporte até o forno de secagem, devido à troca de calor entre a estrutura de alvenaria, os componentes metálicos do sistema e o meio externo.

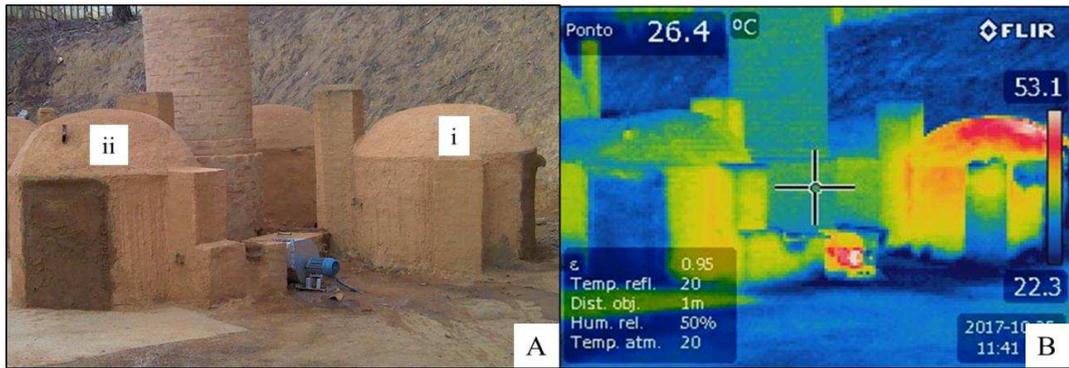


Figura 11 – (A) Secagem da madeira dentro do forno, sendo “i” forno de carbonização e “ii” forno de secagem; (B) Imagem termográfica da secagem dentro do forno utilizando os gases da carbonização - 3ª fase.

4.2.2. Secagem artificial da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos – 2ª etapa

Na Figura 12 é apresentado o perfil térmico do sistema de secagem da madeira dentro do forno em função do tempo para a temperatura de 120 °C dos gases combustos.

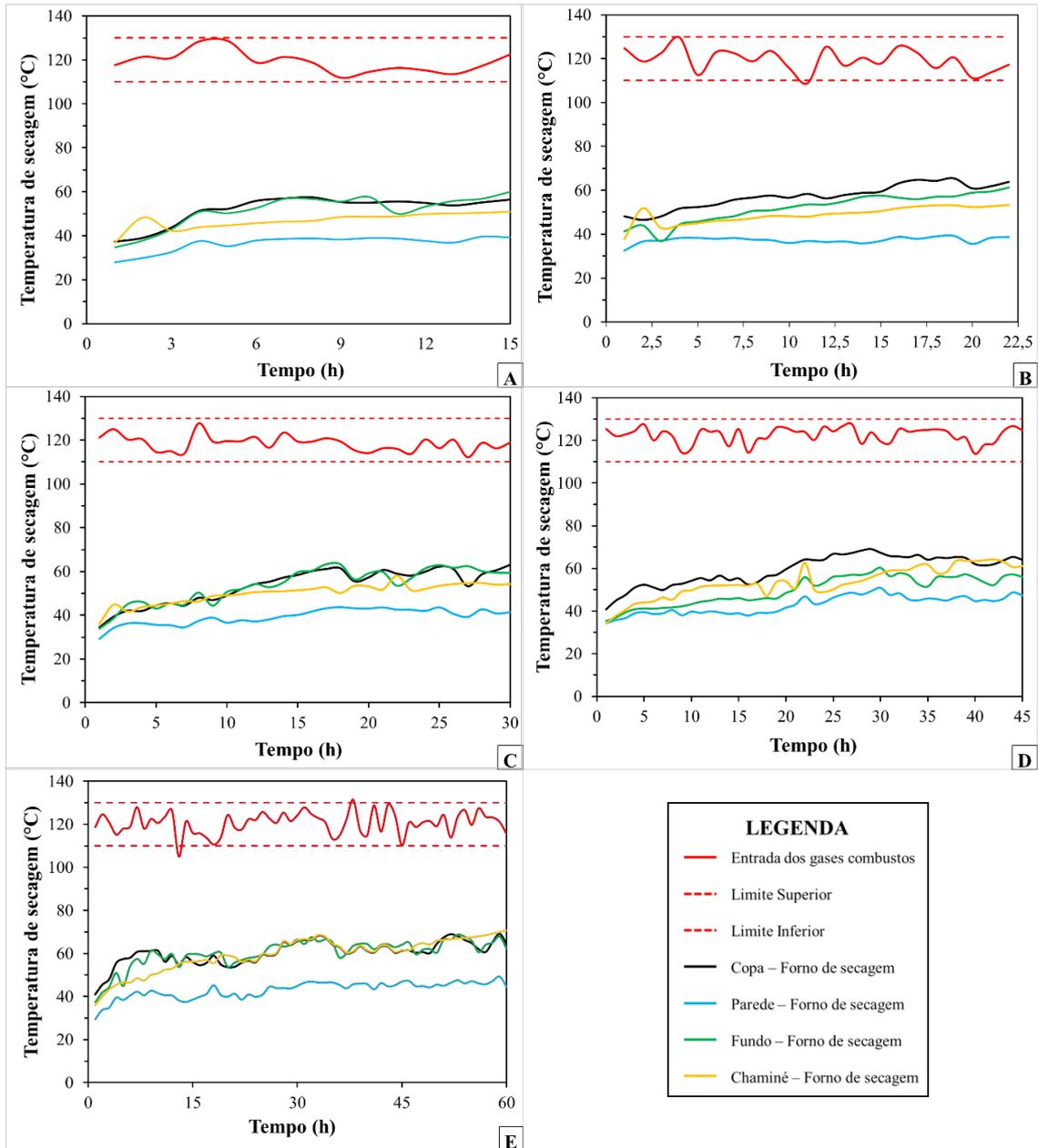


Figura 12 – Perfil térmico do sistema de secagem dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador na temperatura de 120°C. (A) 15 horas; (B) 22,5 horas; (C) 30 horas; (D) 45 horas e (E) 60 horas.

De modo geral, observa-se para as temperaturas dentro do forno que houve um incremento da temperatura com o aumento do tempo de secagem. Tal comportamento foi constatado nas primeiras horas, tendo se estabilizado, em média, depois de transcorrido 55% do tempo de secagem. Além disso, para todos os tratamentos, as temperaturas dentro do forno de secagem foram inferiores a 70 °C.

As menores temperaturas foram observadas nos pontos de coleta localizados na parede, região mediana do forno. Logo, espera-se menor eficiência de secagem da madeira nas regiões

do centro e lado esquerdo, região oposta à entrada dos gases combustos no forno de secagem. As maiores temperaturas foram obtidas na copa e fundo do forno. Estes resultados evidenciam a ocorrência de caminhos preferenciais dos gases na carga de madeira, o que promoverá, provavelmente, heterogeneidade da secagem.

A temperatura observada na chaminé do forno de secagem foi semelhante ao observado na região do fundo do forno para todos os tratamentos. Isto se deve à proximidade dos pontos de coleta de temperatura entre estas regiões. Entretanto, os valores médios observados até o tempo de 30 horas, são inferiores às regiões da copa e fundo do forno de secagem. Este comportamento reflete a perda de carga envolvida no processo, evidenciando que, para menores tempos, há troca de calor entre as estruturas do forno, carga de madeira e gases combustos.

Para maiores tempos de secagem, 45 e 60 horas, as temperaturas médias na chaminé estão próximas ao observado para as regiões com maiores temperaturas dentro do forno de secagem, principalmente depois de transcorrido 30% do tempo. Neste sentido, considera-se que, para tempos maiores, há estabilização do processo, havendo equilíbrio entre as estruturas do forno, carga de madeira e gases combustos.

Outro fator importante observado foi a relação entre a variação de temperatura de entrada dos gases e da chaminé do forno de secagem, principalmente nas fases iniciais da secagem. Sendo assim, os picos de temperatura observados para os gases de entrada provocam o aumento da temperatura na chaminé do forno de secagem.

Isto indica que o tempo de residência dos gases combustos dentro do forno não foi suficiente para realização das trocas térmicas com o sistema de secagem, reduzindo o aproveitamento energético dos gases combustos. O tempo de residência dos gases dentro do forno tem relação direta com a velocidade do ar, assim, de acordo com Tremblay et al. (2000), menores coeficientes de transferência de calor e massa são diretamente proporcionais à velocidade do ar, corroborando com o observado neste estudo.

Na Figura 13 é apresentado o perfil térmico do sistema de secagem da madeira dentro do forno em função do tempo para a temperatura de 150 °C dos gases combustos.

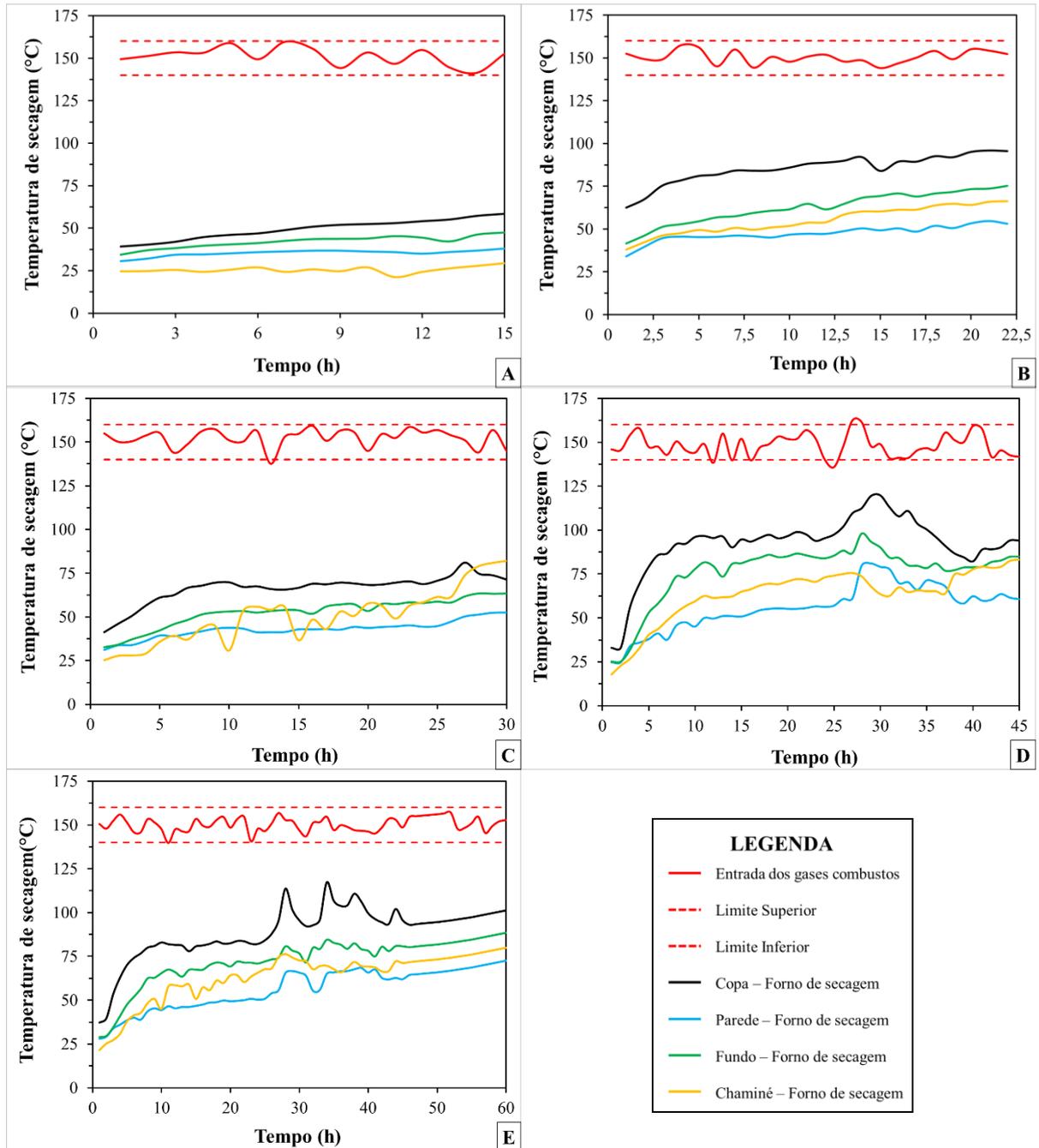


Figura 13 – Perfil térmico do sistema de secagem dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador na temperatura de 150°C. (A) 15 horas; (B) 22,5 horas; (C) 30 horas; (D) 45 horas e (E) 60 horas.

Os parâmetros da secagem dentro do forno utilizando os gases combustos a 150 °C tiveram tendência semelhante aos observados quando se utilizou os gases na temperatura de 120 °C. Houve incremento da temperatura dentro do forno em função do tempo de secagem, sendo este efeito observado, principalmente, nas fases iniciais de cada tratamento. Com base nisso foram coletadas temperaturas próximas a 120 °C dentro do forno de secagem, principalmente nos pontos de coleta da copa.

Verificou-se, para todos os tratamentos, que as maiores temperaturas foram observadas na copa do forno de secagem devido à menor densidade dos gases quentes e secos concentrados nesta região. Vale ressaltar que, semelhante à secagem a 120 °C, esta tendência também foi observada, no entanto, a variação de temperatura entre os pontos de coleta foram mais evidentes quando foram utilizados os gases combustos a 150 °C. Isto indica a probabilidade de maior heterogeneidade na secagem da madeira nas diferentes regiões do forno.

A temperatura no fundo e parede do forno de secagem aumentaram em função do tempo de secagem, sendo a temperatura média da parede inferior à do fundo. Tal fato ocorre devido à dificuldade dos gases em permearem a carga de madeira, afetando sua distribuição dos gases combustos por todas as regiões do forno de secagem, principalmente no lado oposto à sua entrada.

A temperatura obtida na chaminé do forno de secagem foi semelhante à observada no fundo do forno e superior à observada na parede do forno, exceto no tratamento de 15 horas para esta última região. Esta diferença na temperatura está relacionada ao tempo de residência dos gases combustos no forno de secagem e possíveis caminhos preferenciais dos gases pela carga de madeira.

Sobre os tempos de secagem, nota-se que as maiores temperaturas foram observadas nos tratamentos de 45 e 60 horas, com picos de até 119 °C. Estes picos foram obtidos, comumente, a partir da trigésima hora de secagem. Cabe salientar que há uma relação entre os picos de temperatura na copa do forno de secagem com a temperatura de entrada dos gases. Através do controle de temperatura de entrada dos gases combustos no sistema, após cada pico, a temperatura na copa do forno é estabilizada e segue a tendência de aumento. Apesar deste comportamento, o controle do processo foi fundamental para evitar a autoignição da carga de madeira submetida à secagem.

4.3. Eficiência da secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases da carbonização – 1ª Etapa

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros de secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases da carbonização.

Tabela 3 – Parâmetros de secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases da carbonização em função dos tratamentos

Tratamento	UBS_{inicial} (%)	UBS_{pós-secagem} (%)	Perda (-) e Ganho (+) de umidade (%)	Taxa de secagem (kg.h⁻¹)
1ª Fase	52,69 a	55,51 a	+ 2,82 a	- 0,66 a
2ª Fase	53,92 a	55,65 a	+ 1,74 a	- 0,65 a
3ª Fase	52,04 a	39,53 b	-12,51 b	+ 1,84 b

Mesma letra minúsculas entre fases, na coluna, não diferem entre si a 95% de probabilidade pelo teste Tukey. UBS_{inicial}: teor de umidade (%), base seca, antes da secagem da madeira; UBS_{pós-secagem}: teor de umidade (%), base seca, após a secagem da madeira.

Observa-se que os valores médios de teor de umidade inicial, base seca, não diferiram significativamente. Os resultados indicam que o uso dos gases da primeira e segunda fase da carbonização para secagem da madeira não é recomendado, pois não houve remoção de água e sim ganho de massa de água, evidenciado pelos teores de umidade médios pós-secagem e valores negativos de taxa de retirada de água.

A utilização dos gases da 3ª fase para secagem reduziu a umidade inicial da madeira em 12,51%, com remoção de 1,84 kg de água por hora. Os valores médios dos parâmetros de secagem observados para os gases da 3ª fase diferiram significativamente dos demais tratamentos. A redução de umidade foi de 24,04% em relação ao teor de umidade inicial da madeira.

Segundo Oliveira et al. (2013), na primeira e segunda fase da carbonização, o processo é caracterizado como endotérmico, ou seja, parte da energia gerada no processo é consumida no próprio forno para secagem da madeira, liberando grande quantidade de vapor de água. Logo, já era esperado aumento da massa de água nas madeiras enfiadas nas duas primeiras fases do processo de carbonização, visto a menor temperatura do forno (Figura 9) e da quantidade de vapor de água presente nos gases da carbonização.

Por outro lado, quando se utilizou os gases da terceira fase do processo de carbonização, houve remoção de água da madeira. Vale salientar que essa etapa da carbonização é a mais longa, correspondendo a 40% do tempo total de carbonização, além de conter gases com maior temperatura média na saída do forno, 66 °C, e com menor percentual de vapor d'água. De acordo com Costa et al. (2020), durante a carbonização, em temperaturas superiores a 300 °C, ocorre o aumento nas emissões de gases não condensáveis (CO₂, CO, CH₄ e H₂) e a redução da quantidade de água presente nos gases da carbonização, justificando a maior eficiência desta fase em relação às demais que compõem o processo de carbonização.

4.4. Eficiência da secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador – 2ª Etapa

Na tabela 4 são mostrados os teores de umidade antes e após a secagem da madeira dentro do forno, utilizando os gases combustos do queimador em função dos tratamentos.

Tabela 4 – Valores médios de teor de umidade (%), base seca, antes e após secagem da madeira dentro do forno em diferentes tempos e temperaturas

Tempo de Secagem (h)	120 °C		150 °C	
	UBS _{Inicial}	UBS _{Pós-secagem}	UBS _{Inicial}	UBS _{Pós-secagem}
15	48,99	34,73	57,39	39,86
22,5	59,83	43,08	59,83	41,02
30	48,88	30,46	55,74	35,59
45	54,61	31,60	64,52	41,28
60	49,23	29,73	52,00	26,60

UBS_{Inicial}: teor de umidade (%), base seca, antes da secagem da madeira; UBS_{Pós-secagem}: teor de umidade (%), base seca, após a secagem da madeira.

Nota-se que, inicialmente, todas as madeiras utilizadas no experimento estavam com teor de umidade superior a 48%. Estes valores são desejáveis para a realização desta pesquisa, visto que há implicação da redução da taxa de secagem da madeira em teores de umidade inferior ao mencionado, conforme citado por Oliveira (2015), impactando negativamente o tempo de secagem. Além disso, acima do teor de umidade citado, há maior quantidade de água livre presente na madeira.

Em relação à perda de umidade, verificou-se efeito significativo da interação tempo e temperatura de secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos, para todos os parâmetros de secagem avaliados, dessa forma, procedeu-se ao estudo da interação (Tabela 5).

Tabela 5 – Valores médios de perda de umidade (%) em função do tempo de secagem artificial da madeira utilizando os gases combustos

Tempo	Temperatura		Média Geral
	120 °C	150 °C	
15	-14.15 Ab	-17.53 Aa	-15.84
22.5	-16.73 Bb	-18.80 ABa	-17.76
30	-18.42 Cb	-20.15 Ba	-19.28
45	-24.79 Da	-20.64 Bb	-22.71
60	-19.50 Cb	-25.40 Ca	-22.45

Média Geral	-17.53	-20.98	-19.25
Mesmas letras maiúsculas entre tempos (em uma mesma posição) e minúsculas entre posições (em um mesmo tempo), não diferem a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.			

Observa-se, para o efeito temperatura, que a perda de umidade da madeira utilizando os gases combustos a 150 °C diferiram estatisticamente do observado para 120 °C, demonstrando valores superiores, exceto para 45 horas de secagem. Este comportamento pode estar associado ao arranjo da madeira dentro do forno, o que favoreceu a permeabilidade dos gases combustos na carga de madeira e, por consequência, as trocas térmicas para este tratamento.

Alguns estudos sobre modelagem e secagem artificial da madeira demonstram que o uso de temperaturas elevadas reduz o tempo de secagem, devido ao aumento da taxa de aquecimento da madeira e, por consequência, aumento na velocidade de movimentação da água interna na madeira para a superfície (Coelho, 2013; Oliveira et al., 2017). Isto corrobora com o observado neste estudo quando comparadas as diferentes temperaturas.

Em relação ao tempo de secagem, observa-se que, de modo geral, houve aumento da perda de umidade em função do aumento do tempo. Para a temperatura de 120 °C, o tempo de 45 horas de secagem demonstrou maiores perdas e diferiu estatisticamente dos demais, por outro lado, o tempo de 15 horas obteve menores perdas de umidade.

Já para a temperatura de 150 °C, a maior perda foi observada para o tempo de 60 horas, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Contudo, não foi observado diferença estatística entre os tempos de 22,5, 30 e 45 horas de secagem, o que pode estar associado à estabilização da perda de umidade neste intervalo de tempo. Este comportamento pode estar associado à maior quantidade e facilidade de retirada da água livre até próximo ao ponto de saturação das fibras ($\approx 30\%$), conforme apresentado na Tabela 4.

Face a isto, estes resultados quando associados ao observado na Tabela 4 indicam que, para teores de umidade próximos ou acima de 50%, base seca, demandam tempo de secagem artificial dentro do forno por, no mínimo, 30 horas e 22,5 horas de secagem utilizando os gases a 120 °C e 150 °C, respectivamente.

Em relação aos métodos convencionais de secagem, Zanuncio et al. (2015), em estudos com secagem natural da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia*, observaram reduções de umidade de 0,03 e 0,02%.hora⁻¹, respectivamente. Ao comparar com os resultados obtidos neste estudo, a secagem dentro do forno a 150 °C ocasionou redução média de 0,16%.hora⁻¹ de umidade; isso equivale a 6,4 vezes de redução no tempo de secagem ao ar livre por dia, evidenciando o expressivo ganho em tempo na secagem artificial da madeira dentro do forno.

Avaliando a taxa de secagem da madeira, verificou-se também interação significativa entre a temperatura e o tempo de secagem (Tabela 6). Dessa forma, procedeu-se com o estudo da interação e avaliação do efeito da temperatura no tempo de secagem e o efeito do tempo de secagem na temperatura.

Tabela 6 – Valores médios da taxa de secagem (kg.h^{-1}) em função do tempo de secagem artificial da madeira, por carga total, utilizando os gases combustos.

Tempo	Temperatura		Média Geral
	120 °C	150 °C	
15	3.460 Ab	4.189 Aa	3.824
22.5	2.453 Ba	2.664 Ba	2.559
30	2.213 Ba	2.259 Ba	2.236
45	2.017 Ca	1.762 Ca	1.889
60	1.171 Cb	1.578 Ca	1.375
Média Geral	2.165	2.481	2.323

Mesmas letras maiúsculas entre tempos (em uma mesma posição) e minúsculas entre posições (em um mesmo tempo), não diferem a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

De modo geral, não foi observado diferenças estatísticas entre as temperaturas avaliadas, exceto nos tempos de 15 e 60 horas, sendo os maiores valores observado de taxa de secagem para a temperatura de 150 °C. Isto pode estar associado ao maior fornecimento de energia à madeira, representando um aumento médio de 21 e 35% em relação a utilização dos gases combustos a 120 °C.

Em relação ao tempo, nota-se comportamento semelhante dentro de cada temperatura, sendo os maiores valores observados no tempo de 15 horas, o que diferiu estatisticamente dos demais. De acordo com a tabela 4, inicialmente, todos os tratamentos apresentavam teor de umidade variando entre 48 e 65%, o que denota elevada quantidade de água livre na madeira, prevalecendo a movimentação da água por capilaridade e, em menor teor, por difusão. Isto corrobora com o observado para o tratamento de secagem por 15 horas, uma vez que a demanda energética para retirada da água livre é menor, correspondendo à 569 kcal.kg^{-1} (SKAAR, 1972).

Quando a madeira atinge teores de umidade próximos a 30% (PSF) a movimentação da água na madeira passa a ocorrer, basicamente, por difusão, demandando maior quantidade de energia, correspondendo à 829 kcal.kg^{-1} (SKAAR, 1972). Neste sentido, nota-se que o tempo e a temperatura exercem papel importante a partir de 45 horas a 150 °C, elevando a taxa de secagem.

De modo geral, para cada 1 hora adicionada à secagem foi retirada, aproximadamente, 80 e 200 gramas de água por quilograma de madeira utilizando temperatura de 120 e 150 °C, respectivamente. Cardoso (2015), utilizando os gases combustos para secagem da madeira em secador metálico, obteve taxa de retirada de água média de 29 gramas de água/kg de madeira.h⁻¹ utilizando temperatura dos gases combustos entre 140 e 160 °C, por 68 horas.

Já Oliveira et al. (2017), estudando secagem de *Eucalyptus* em altas temperaturas (50 a 150 °C), em estufa laboratorial, observaram aumento da taxa de secagem em função da elevação da temperatura e redução no tempo de secagem, o que corrobora com o observado neste estudo. Na temperatura de 150 °C, os autores observaram taxa de secagem média de 1,68 %.hora⁻¹; inferior ao observado pelo presente estudo, no qual, em média, constatou-se 3,67 %.hora⁻¹ para ambas as temperaturas. Vale ressaltar que na secagem dentro do forno há maior volume de toras, com dimensões distintas e variabilidade na disposição, ocasionando maior massa de água retirada.

Na Tabela 7 é apresentada a secagem da madeira por posição dentro do forno na temperatura de 120 °C, demonstrando interação significativa entre posição e tempo de secagem para perda de umidade (%). Dessa forma, procedeu-se com o estudo da interação entre tempo e temperatura através do desdobramento entre os níveis avaliados.

Tabela 7 – Valores médios de perda de umidade (%) em função do tempo de secagem, por posição dentro do forno, utilizando os gases combustos a 120°C.

Tempo	Posição					Média Geral
	P	LD	C	LE	F	
15	-5.19 Aa	-24.30 ABc	-7.99 ABab	-5.63 Aa	-10.54 Ab	-10.73
22,5	-4.32 Aa	-23.55 Ac	-6.88 Aa	-6.94 Aa	-12.02 Ab	-10.74
30	-10.29 Ba	-27.51 Bc	-10.22 Aa	-8.34 ABa	-16.31 Bb	-14.53
45	-14.25 Cab	-37.97 Dd	-14.66 Bb	-11.14 Ba	-22.57 Cc	-20.12
60	-12.41 BCa	-33.29 Cd	-16.67 Bb	-11.71 Ba	-20.88 Cc	-18.99
Média Geral	-9.29	-29.32	-11.28	-8.75	-16.47	-15.02

Mesmas letras maiúsculas entre tempos (em uma mesma posição) e minúsculas entre posições (em um mesmo tempo), não diferem a 95% de probabilidade pelo teste Tukey. (P): porta; (LD): lado direito; (C): centro; (LE): lado esquerdo e; (F): fundo

De modo geral, a perda de umidade por posição dentro do forno na temperatura de 120 °C demonstra maiores valores no lado direito do forno, o qual diferiu estatisticamente das demais posições. Outra posição com diferenças significativas de perda de umidade foi o fundo do forno. Estas posições estão localizadas na entrada e saída dos gases da carbonização, respectivamente. Isto justifica os maiores valores observados, pois são posições que

apresentam maiores temperaturas (Figura 12) e, por consequência, consistem nos locais onde ocorre maior perda de umidade.

Observa-se, de modo geral, que as madeiras posicionadas no lado esquerdo, porta e centro do forno secaram menos, demonstrando diferenças estatísticas em relação às demais. Dentre essas posições, o lado esquerdo foi o menos eficiente na secagem, ou seja, proporcionou menor perda de umidade. Isso se deve ao fato de o lado esquerdo ser oposto ao local de inserção dos gases combustos e, conseqüentemente, os gases chegaram a esta região com menor temperatura e velocidade.

Em relação ao tempo de secagem, nota-se maiores perda de umidade a 45 horas, o qual diferiu estatisticamente dos demais tratamentos. Por outro lado, não foi observado diferenças significativas entre os tempos de 15 e 22,5 horas, corroborando à demanda de elevados tempos de secagem para madeiras com umidade > 50%, quando utilizado gases combustos a 120 °C.

A secagem da madeira por posição dentro do forno na temperatura de 150 °C também demonstrou interação significativa entre posição e tempo de secagem para perda de umidade (%) (Tabela 8). Sendo assim, procedeu-se com o estudo e desdobramento das interações entre tempo de secagem e posição do forno.

Tabela 8 – Valores médios de perda de umidade (%) em função do tempo de secagem, por posição dentro do forno, utilizando os gases combustos a 150°C.

Tempo	Posição					Média Geral
	P	LD	C	LE	F	
15	-5.11 Aa	-14.25 Ab	-5.79 Aa	-5.99 Aa	-5.92 Aa	-7.41
22.5	-7.83 Aa	-24.95 Bb	-7.66 Aa	-6.67 ABa	-9.49 Aa	-11.32
30	-8.24 ABa	-31.95 Cc	-9.54 Ba	-9.98 Ba	-17.99 Bb	-15.54
45	-11.82 Ba	-38.45 Dc	-17.31 Cb	-15.05 Cab	-16.86 Bb	-19.90
60	-21.66 Cb	-34.59 CDc	-18.44 Cab	-18.65 Cab	-17.96 Ba	-22.26
Média Geral	-11.71	-28.84	-11.75	-11.27	-13.64	-15.29

Mesmas letras maiúsculas entre tempos (em uma mesma posição) e minúsculas entre posições (em um mesmo tempo), não diferem a 95% de probabilidade pelo teste Tukey. (P): porta; (LD): lado direito; (C): centro; (LE): lado esquerdo e; (F): fundo

Assim como ocorreu para os tratamentos realizados à temperatura de 120 °C, as madeiras enfiadas do lado direito do forno secaram mais em comparação às demais posições. Devido ao local de entrada dos gases combustos ser nesta região, foi observado valores médios estatisticamente diferentes de perda de umidade nesta posição, promovendo, em média, perda de umidade 2,38 vezes superior às demais posições.

Além disso, em relação ao tempo de secagem, de modo geral foi observado redução da umidade em função do tempo, principalmente a 30, 45 e 60 horas de secagem. Entretanto, independente da temperatura utilizada para secagem da madeira, verificou-se que a secagem não foi homogênea, ou seja, o lado direito teve uma redução maior de umidade em relação às demais. As outras posições, devido aos caminhos preferenciais dos gases, perda de carga e dificuldade do gás em permear a carga de madeira, obtiveram menores reduções de umidade, no entanto, a amplitude entre elas foi menor em comparação às madeiras posicionadas no lado direito do forno.

Cardoso (2015), também avaliando a secagem artificial da madeira em secador metálico utilizando os gases combustos da carbonização, observou que as regiões mais distantes da entrada dos gases, no secador, tiveram as menores temperaturas, impactando diretamente na eficiência de secagem da madeira. Isto resultou em menor redução do teor de umidade, corroborando com o observado neste estudo.

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os valores médios da taxa de secagem da madeira por posição no forno nas temperaturas de 120 e 150 °C, respectivamente. Observa-se que, para ambas as temperaturas, houve interação significativa entre posição e tempo de secagem, sendo realizado o desdobramento das interações entre os níveis avaliados.

Tabela 9 – Valores médios de taxa de secagem (kg.h^{-1}) em função do tempo de secagem, por posição dentro do forno, utilizando os gases combustos a 120°C.

Tempo	Posição					Média Geral
	P	LD	C	LE	F	
15	0.021 Ac	0.079 Aa	0.034 Ab	0.021 Ac	0.040 Ab	0.039
22.5	0.008 Bc	0.039 Ca	0.012 Bc	0.013 Ac	0.026 Bb	0.020
30	0.019 ABc	0.052 Ba	0.018 Bc	0.017 Ac	0.031 ABb	0.027
45	0.019 ABc	0.046 BCa	0.021 Bbc	0.015 Ac	0.030 ABb	0.026
60	0.010 Bb	0.026 Da	0.015 Bab	0.011 Ab	0.024 Bb	0.017
Média Geral	0.017	0.051	0.022	0.016	0.031	0.027

Mesmas letras maiúsculas entre tempos (em uma mesma posição) e minúsculas entre posições (em um mesmo tempo), não diferem a 95% de probabilidade pelo teste Tukey. (P): porta; (LD): lado direito; (C): centro; (LE): lado esquerdo e; (F): fundo

Tabela 10 – Valores médios de taxa de secagem (kg.h^{-1}) em função do tempo de secagem, por posição dentro do forno, utilizando os gases combustos a 150°C.

Tempo	Posição					Média Geral
	P	LD	C	LE	F	
15	0.017 Ab	0.047 ABa	0.018 Ab	0.021 Ab	0.021 Bb	0.025

22.5	0.019 Ab	0.042 Ba	0.014 Ab	0.012 Ab	0.019 Bb	0.021
30	0.014 Ac	0.058 Aa	0.017 Ac	0.016 Ac	0.034 Ab	0.028
45	0.015 Ab	0.047 Ba	0.023 Ab	0.020 Ab	0.024 ABb	0.026
60	0.025 Ab	0.035 Ba	0.019 Ab	0.022 Ab	0.018 Bb	0.024
Média Geral	0.018	0.046	0.018	0.018	0.023	0.025

Mesmas letras maiúsculas entre tempos (em uma mesma posição) e minúsculas entre posições (em um mesmo tempo), não diferem a 95% de probabilidade pelo teste Tukey. (P): porta; (LD): lado direito; (C): centro; (LE): lado esquerdo e; (F): fundo

Independente da temperatura dos gases combustos utilizados na secagem artificial, observa-se que as taxas de secagem das madeiras posicionadas no lado direito do forno foram superiores às demais posições, diferindo estatisticamente das demais. Devido à maior temperatura de entrada dos gases combustos nesta região, nota-se que a taxa de secagem no lado direito do forno de secagem foi, em média, 57 % superior para ambas as temperaturas avaliadas.

As madeiras posicionadas mais ao fundo do forno tiveram maiores taxas de secagem em relação às demais, exceto pelo lado direito. Este comportamento fica mais evidente para a temperatura de 120 °C, onde os valores médios observados nesta região diferiram estatisticamente dos obtidos na porta, centro e lado esquerdo. Isto demonstra que menor temperatura pode promover maior heterogeneidade na secagem artificial, o que não é desejável.

De modo geral, nota-se que há formação de caminhos preferenciais dentro do forno, principalmente nas regiões localizada nas proximidades de entrada e tiragem dos gases combustos do forno de secagem. Isto impacta diretamente a redução da umidade nas demais regiões, principalmente na porta e lado esquerdo do forno, indicando a necessidade de alteração do local de inserção dos gases combustos.

Além disso, este comportamento está associado à permeabilidade dos gases combustos através da carga de madeira, chegando até estas posições um gás mais frio e denso. Neste sentido, há demanda de maior tempo de secagem para que as madeiras nestas regiões aqueçam e iniciem o processo de secagem. Apesar dessa demanda por tempo, acredita-se que a remoção de água nestas posições ocorra tardiamente.

Os valores médios observados neste estudo corroboram com o observado por Cardoso (2015), uma vez que as maiores reduções do teor de umidade obtidas pelo autor foram nos estratos superiores do secador metálico, onde apresentaram elevadas temperaturas devido à proximidade com as entradas dos gases. Vale ressaltar que a madeira é um material heterogêneo, com diferentes componentes anatômicos, presença de casca e dimensões distintas, o que afeta diretamente a movimentação da água em seu interior.

A perda de umidade ao longo do comprimento das toras de madeira em função da posição dentro do forno e do tempo de secagem é observada na Figura 14 para os gases combustos a 120 e 150 °C, respectivamente.

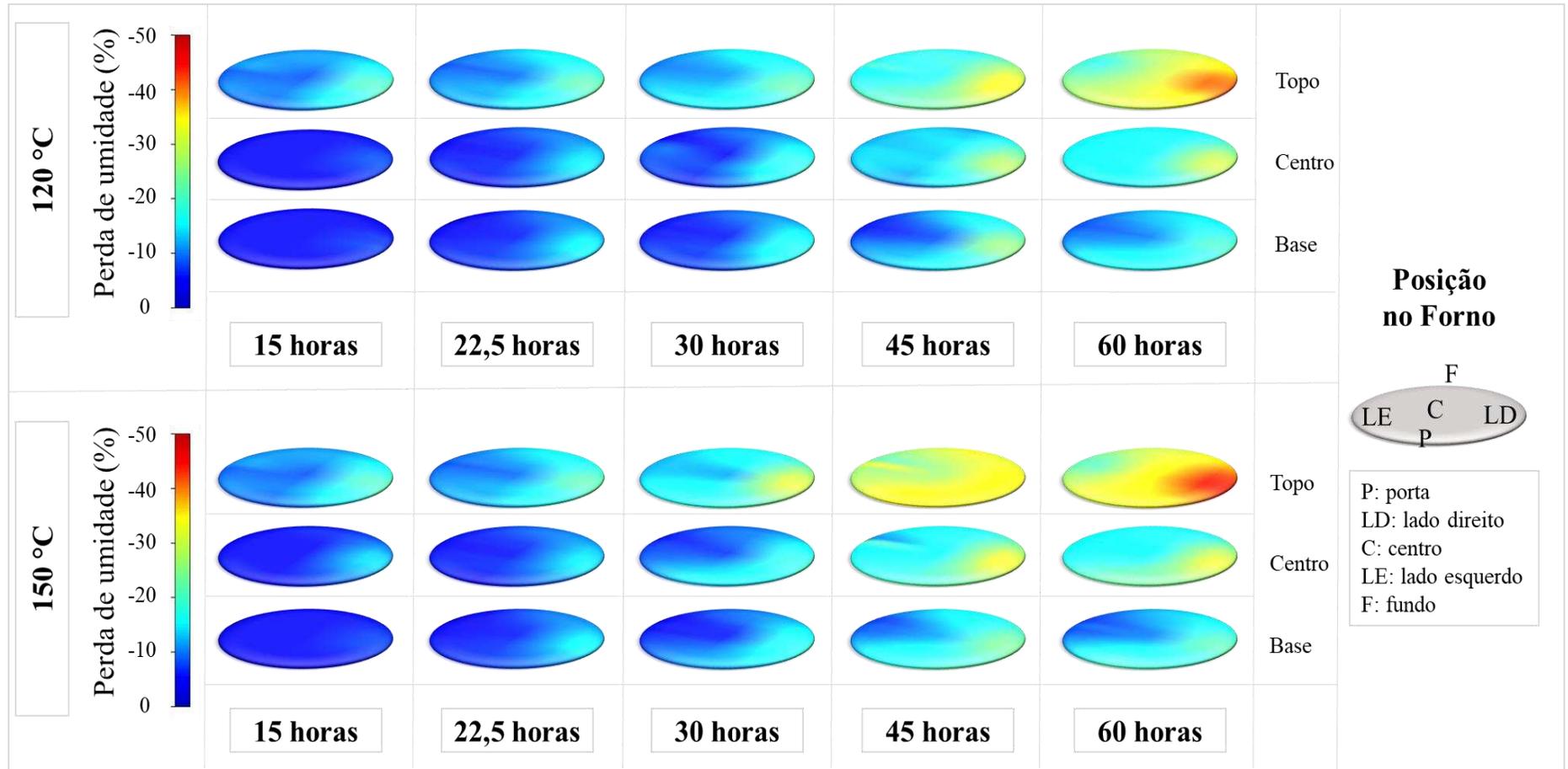


Figura 14. Valores médios observados de perda de umidade (%), por posição na tora de madeira, em função da posição dentro do forno, utilizando os gases combustos a 120 °C e 150 °C.

De modo geral, nota-se que a perda de umidade é maior na parte superior das toras de madeira, ou seja, no estrato superior do forno e, com o incremento do tempo de secagem, isso fica mais evidente, principalmente na lateral direita. Os gases combustos são inseridos na parte superior direita da parede dos fornos, logo, nota-se que ocorre maior perda de umidade sempre nesta posição.

O aumento no tempo de secagem resultou em maior perda de umidade no sentido topo-base. Tal comportamento pode ser observado mais evidentemente em todas as posições do forno a partir de 30 horas de secagem. À medida que o tempo de secagem aumenta, é gerado um gradiente entre as regiões de maior e menor teor de umidade, favorecendo a movimentação da água na madeira.

Outros autores citam comportamento semelhante para a relação água x madeira e para a movimentação da água durante a secagem. Monteiro et al. (2018) constatou elevado fluxo de água livre para madeiras de *Eucalyptus sp.* com teor de umidade superior a 70%, Donato et al. (2017), por sua vez, observou maiores teores de umidade no centro das toras de madeira; corroborando com o observado neste estudo.

Devido à temperatura dos gases combustos, estes ficam menos densos e tendem a se concentrar na parte de cima do forno. Este efeito pode ser observado para o tempo de 15 horas, onde o uso dos gases combustos a 150 °C promoveu maior perda de umidade. Neste sentido, verifica-se a necessidade em alterar o local de entrada dos gases ou aumento no número de pontos de inserção destes no forno de secagem. Vale ressaltar o risco de incêndio nesta região do forno em função da elevada temperatura dos gases.

As posições do centro e base nas toras de madeira, localizadas na região central e lateral esquerda do forno de secagem, tiveram menor perda de umidade, independentemente do tempo e temperatura. A baixa eficiência de secagem nestas posições ocorreu devido às trocas de calor entre o gás e madeira que se encontravam em outras posições no forno, reduzindo o potencial de secagem dos gases combustos. Comportamento semelhante foi observado por Cardoso (2015), que constatou menores perdas de umidade nas regiões distantes dos locais de entrada dos gases.

As madeiras acondicionadas próximas à porta e fundo do forno de secagem apresentaram, também, aumento da perda de umidade em função do tempo. Isto pode ser atribuído à carga de madeira que estava arranjada na posição horizontal na copa do forno de secagem. Durante a inserção dos gases combustos no forno, este arranjo fez com que os gases se distribuíssem na região superior e, em seguida, permeou o restante da carga de madeira.

Cabe salientar que a elevada temperatura média observada na região do fundo do forno (Figuras 11 e 12) justificam as maiores perdas de umidade nesta posição. Além disso, soma-se o efeito da chaminé, que força o gás a passar pela região oposta à porta.

4. CONCLUSÕES

O uso dos gases da carbonização nas fases endotérmicas da secagem da madeira dentro do forno não é recomendado, exceto quando se utiliza os gases da 3ª fase (exotérmica), os quais têm potencial de aproveitamento para secagem, apesar da baixa eficiência.

Apesar da redução da umidade quando utilizados os gases da fase exotérmica da carbonização, o aproveitamento dos gases combustos demonstrou maior viabilidade técnica devido à elevada temperatura atingida no interior do forno, promovendo maior redução do teor de umidade e maior taxa de retirada de água.

A secagem da madeira dentro do forno a 150 °C foi mais eficiente em relação aos tratamentos realizados a 120 °C. O tempo de 30 horas de secagem demonstra perdas significativas de umidade e taxa de retirada de água, sendo o mais recomendado para redução do teor de umidade e produção de carvão vegetal.

As posições do lado direito e fundo demonstraram melhor secagem devido aos locais de entrada e saída dos gases, respectivamente. A perda de umidade no forno de secagem ocorre no sentido topo-base. Desse modo, ressalta-se a necessidade em avaliar outros locais de inserção dos gases ou aumentar a quantidade de locais para inserção dos mesmos.

A secagem dentro do forno mostra-se viável tecnicamente, entretanto, deve-se avaliar a viabilidade econômica em relação aos investimentos em infraestrutura e consumo de energia elétrica. Além disso, faz-se importante o estudo econômico sobre o transporte do campo à unidade produtora de carvão vegetal, verificando se é mais vantajoso transportar a madeira com maior teor de umidade ou deixar que elas sequem no campo, ao ar livre, por um longo período de tempo, e realizando a secagem artificial em toras com menores teores de umidade, por exemplo, abaixo de 40%.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Sociedade de Investigações Florestais (SIF) e a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo aporte das bolsas de estudos; a Empresa ArcelorMittal pelo financiamento do projeto; ao departamento de engenharia florestal (DEF/UFV) e Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) pelo aporte em infraestrutura e desenvolvimento deste estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard method for chemical analysis of charcoal**. Philadelphia, 1982. 1042 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.941** Madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.929** Madeira - determinação do teor de umidade de cavacos – método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017. 3 p.

BARAÚNA, E. E. P. **Permeabilidade das madeiras de Amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e Faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke)**. 2010. 69 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2010.

CARDOSO, M.T.; DAMÁSIO, R.A.P.; CARNEIRO, A.C.O.; JACOVINE, L.A.G.; VITAL, B.R.; BARCELLOS, D.; Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras, MG. vol.16: p.115-124. 2010

CARDOSO, M. T.; **Secagem de toras para produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases da carbonização**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). 2015. 74p. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; 2015.

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.

CHRISTENSEN, G. N.; KELSEY, K. E.; The rate of sorption of water vapor by wood. **Holz Roh Werkst**, 178–188 p., 1959.

COELHO, L. D. N. **Modelagem e simulação da secagem de partículas sólidas de biomassa em temperaturas típicas de combustão**. 2013. 86p. Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2013.

COSTA, A. C. S.; LEAL, C. S.; SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; Propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Ciência da Madeira**. Pelotas – RS; v.8, n.1, p.10-20; 2017.

COSTA, J. M. F. N.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; ARAUJO, S. O.; CANAL, W. D.; Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, v. 11, n.1, p. 53-62, 2020.

DAMASIO, R. A. P.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; BARCELOS, D. C.; PEREIRA, B. L. C.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, C. M. S.; Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Revista Ciência da Madeira**, v.6; n.1; p.11-22; 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v61p11-22

DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; CANDIDO, W. L.; MAGALHAES, M. A.; SILVA, C. M. S.; Secagem e perfil de umidade da tora em função do diâmetro e comprimento. **Agroforestalis News**, v.2, n.2, 2017.

DONATO, D. B.; **Desenvolvimento e avaliação de fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 98p.

EVANGELISTA, W. V.; **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V. LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-266.

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

HOFSTETTER, K.; HINTERSTOISSER, B.; SALMÉN, L.; Moisture uptake in native cellulose—the roles of different hydrogen bonds: a dynamic FT-IR study using deuterium exchange. **Cellulose**, v. 13, p. 131–145, 2006.

MONTEIRO, T.; LIMA, J.; SILVA, J.; ZANUNCIO, A. J.; BARAÚNA, E.; Water flow evaluation in *Eucalyptus* and *Corymbia* short logs. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 2. 7p. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.065917>

OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; PEREIRA, B.L.C.; VITAL, B.R.; CARVALHO, A.M.M.L.; TRUGILHO, P.F.; Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**. V.37: p.557-566. 2013.

OLIVEIRA, A. C.; **Secagem de toras de eucalipto**. 2015. 81p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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 temperature. **Revista Árvore**, Viçosa, v 41, n. 2, p.1-9, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000200007>

OLIVEIRA, A. C.; RAMOS, D. C.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O. Carbonization temperature and charcoal properties at different positions in rectangular kiln. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife-PE, v.15, n.4, e8493, 2020. <DOI:10.5039/agraria.v15i4a8493>

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal**. 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C.; Correlações entre a relação cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n.98, p.217-225, 2013.

R CORE TEAM, R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (2015). URL <https://www.R-project.org/>.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; ANDRADE, H. B.; FARIA, A. L. R. Air drying of logs from *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. **Cerne**, v.16, n.4, p.565-572, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602010000400016>>.

SKAAR, C.; **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218p

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta: Tappi TechnologyPark, 1996. v. 1.

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 264 om-88: preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta: Tappi Technology Park, 1998. v. 1.

TEIXEIRA, R., U. **Efeito da produtividade florestal e permeabilidade da madeira de *Eucalyptus* spp. na velocidade de secagem**. 2015. 46 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TREMBLAY, C.; CLOUTIER, A.; FORTIN, Y. Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying. **Wood Science and Technology**, v. 34, n. 3, p. 253-276, 2000.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, E. M. G. C.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; Propriedades energéticas da madeira e carvão de *Corymbia* e *Eucalyptus* em diferentes condições de secagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v.10, n.3, p.432-436, 2015.

RESUMO

SIQUEIRA, Humberto Fauller, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2021. **Aumento do rendimento gravimétrico por meio da secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

O consumo de carvão vegetal no Brasil tem aumentado devido ao crescimento do setor siderúrgico. Essa tendência reflete no aumento da produção de carvão vegetal para suprir a demanda do mercado. Tecnologias que aumentem o rendimento em carvão e a produtividade dos fornos tornam-se cada vez mais atrativas para o setor. Neste contexto, o uso dos gases combustos do queimador para secagem da madeira dentro do próprio forno torna-se uma alternativa atrativa, visto que elevados teores de umidade prolongam o ciclo da carbonização, além de afetar o rendimento e a qualidade do carvão vegetal. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da secagem da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos do queimador no rendimento e propriedades do carvão vegetal. Utilizou-se o sistema fornos-fornalha, com adaptação para transporte dos gases combustos do queimador até o forno de secagem e posterior ignição do forno. Utilizou-se madeira de *Eucalyptus sp.*, aos 7 anos de idade. Determinou-se o teor de umidade inicial, base seca, da madeira antes de cada tratamento, visando a obtenção do rendimento gravimétrico em função do tempo (15, 22,5 e 30 horas) e temperatura (120 e 150 °C) de secagem. Para avaliar o efeito da secagem dentro do forno, após cada tratamento de secagem da madeira, procedeu-se, imediatamente, à ignição do forno e condução da carbonização. Determinaram-se os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, atíço e finos, e as propriedades do carvão vegetal. O uso dos gases combustos a 150 °C foi, em média, superior aos tratamentos a 120 °C e a testemunha, independentemente do tempo, resultando ganhos de rendimento gravimétrico em carvão vegetal superior a 7%. De modo geral, o uso dos gases combustos não ocasionou alterações significativas nas propriedades químicas do carvão vegetal, exceto para os produzidos utilizando por um período de 22,5 horas, o qual ficou mais friável, provavelmente devido ao maior teor de umidade inicial. Concluiu-se que a secagem dentro do forno, seguida de carbonização é viável tecnicamente, e que a temperatura de secagem de 150 °C durante 22,5 horas proporcionou maiores ganhos em rendimento gravimétrico, sem perda de qualidade do carvão vegetal.

Palavras – chave: Aproveitamento energético. Carbonização. Secagem artificial.

ABSTRACT

SIQUEIRA, Humberto Fauller, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April 2021. **Increased yield performance by drying wood inside the oven using the combusted gases of the burner.** Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

The consumption of charcoal in Brazil has increased due to the growth of the steel sector, the main consuming source of this input. This trend is reflected in the increase in charcoal production to meet market demand. Technologies that increase coal yield and kiln productivity make it increasingly attractive to the sector. In this context, the use of combustion gases from the burner to dry the wood inside the oven itself becomes an alternative, since high levels of humidity prolong the carbonization cycle, in addition to affecting the yield and quality of charcoal. In view of this, the objective of this study was to evaluate the effect of drying the wood inside the oven using the combustion gases of the burner on the charcoal yield and properties. The furnace-furnace system was used, with adaptation to transport the combustion gases from the burner to the drying oven and subsequent ignition of the oven. Eucalyptus sp. Wood, 7 years old, from plantations acquired in the rural area of Viçosa-MG was used. The initial moisture content, dry base, of the wood was determined before each treatment, specialized to obtain the gravimetric yield as a function of drying time (15, 22.5 and 30 hours) and temperature (120 and 150 ° C). To evaluate the drying effect inside the oven, after each drying treatment of the wood, the oven was ignited immediately and the carbonization was conducted. Gravimetric molds in charcoal, hot and fine, and the properties of charcoal were determined. The use of combustion gases at 150 ° C was, on average, higher than treatments at 120 ° C and the control, regardless of time, gains greater than 7. In general, there were no significant differences in charcoal properties, however, the charcoal produced over 22.5 hours was the most friable, due to the higher initial moisture content. It was concluded that drying in the oven followed by carbonization is technically feasible, and that the drying temperature of 150 ° C for 15 hours provided greater gains in gravimetric yield, without loss of quality of charcoal.

Keywords: Energy use. Carbonization. Artificial drying.

CAPÍTULO III

AUMENTO DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO EM CARVÃO VEGETAL POR MEIO DA SECAGEM DA MADEIRA DENTRO DO FORNO UTILIZANDO OS GASES COMBUSTOS DO QUEIMADOR

1. INTRODUÇÃO

O consumo de carvão vegetal no Brasil tem aumentado, principalmente, para atendimento ao setor siderúrgico e metalúrgico, que utiliza, aproximadamente, 83% de todo carvão vegetal produzido no país (EPE, 2020). O estado de Minas Gerais se destaca como principal estado produtor e consumidor, com 11,26 milhões de metros de carvão vegetal consumidos no ano de 2019, representando um aumento no consumo de 7,96% em relação ao ano de 2018 (SINDIFER, 2020).

Esse aumento impacta diretamente a produção do carvão vegetal, uma vez que existe um planejamento em longo prazo. Apesar do ciclo de crescimento das árvores, após a colheita, a secagem da madeira demanda grandes períodos de secagem até atingir os teores de umidade adequados à produção de carvão vegetal. A secagem ao ar livre destaca-se como principal modelo adotado pelos produtores de carvão vegetal no Brasil devido ao baixo custo.

Na literatura há relatos de tempos de secagem da madeira ao ar livre variando entre 90 e 200 dias para atingir o teor de umidade próximo ao recomendado para produção de carvão vegetal, ou seja, 30% (ZANUNCIO, et al., 2013; DONATO et al., 2017). Essa variação no tempo de secagem da madeira é influenciada, principalmente, por fatores ambientais e inerentes à madeira, sendo um gargalo para a atividade, principalmente nos períodos em que há aumento no consumo deste biorredutor.

Dentre as alternativas para reduzir o tempo de secagem da madeira ao ar livre, tem-se a secagem artificial utilizando os gases combustos do queimador, a qual pode ser realizada utilizando secadores ou o próprio forno de produção do carvão vegetal. Segundo Figueiró (2018) a secagem artificial utilizando secador metálico é viável tecnicamente, proporcionando uma redução média de 8% no teor de umidade da madeira e aumento de 3,3% na produção de carvão vegetal. Cardoso (2015), avaliando a secagem artificial da madeira em secador metálico utilizando os gases combustos da carbonização, relatou redução relativa no teor de umidade próximo a 36% e ganhos de 4,85% no rendimento gravimétrico. Apesar das vantagens

proporcionadas por esta tecnologia, nota-se que, há maior demanda por investimento inicial em infraestrutura, movimentação da madeira na unidade produtora e elevado consumo de energia elétrica, inviabilizando a sua aplicação em escala industrial.

Por outro lado, a secagem artificial da madeira dentro do próprio forno de carbonização, minimiza esses impactos, porém é preciso avaliar o efeito do tempo de secagem no ciclo de carbonização. No entanto, isso se mostra interessante, pois todo o sistema já estará aquecido e pronto para iniciar o processo de carbonização, o que pode maximizar o rendimento gravimétrico e, desse modo, minimizar o impacto do aumento do ciclo de carbonização.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do tempo e temperatura de secagem da madeira dentro do forno, utilizando os gases combustos do queimador no tempo total de carbonização, e seus impactos no rendimento gravimétrico e as propriedades do carvão vegetal.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo principal

O objetivo principal deste estudo foi avaliar o efeito da secagem artificial da madeira dentro do forno utilizando os gases combustos da carbonização, em diferentes temperaturas e tempos, no rendimento e qualidade do carvão vegetal.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram: obter o perfil térmico do forno de secagem artificial da madeira utilizando os gases combustos do queimador seguido de carbonização; avaliar o efeito da secagem artificial dentro do forno no tempo total de carbonização e; determinar o rendimento gravimétrico e qualidade do carvão vegetal em função dos diferentes tempos e temperaturas de secagem.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Obtenção e caracterização da matéria prima

A madeira utilizada foi do gênero *Eucalyptus* sp., fornecida pela empresa parceira do estudo, proveniente de plantios com 7 anos de idade. As toras foram seccionadas com comprimento médio de 2 metros, em seguida, foram novamente seccionadas em toras de comprimento médio de 1 metro, de acordo com a altura da parede do forno utilizado para realização do experimento. Para fins de homogeneização da carga de madeira, definiram-se três centros de classes de diâmetro: 9 centímetros, 12 centímetros e 15 centímetros com amplitude de ± 3 centímetros.

As propriedades da madeira foram determinadas selecionando 12 toras por classe de diâmetro, retirando discos de 5 cm de espessura nas posições 25, 50 e 75% do comprimento total de cada tora. A determinação da relação cerne/alburno (C/A) foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Evangelista (2007), obtida pela equação 1:

$$\frac{C}{A} = \frac{Dc^2}{D^2 - Dc^2} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que: Dc - Diâmetro do cerne, em cm; D - Diâmetro do disco sem casca, em cm.

Depois de obter a relação cerne/alburno, de cada disco de madeira retirou-se duas cunhas opostas, passando pela medula, para determinação da densidade básica, de acordo com a NBR 11.941 (ABNT, 2003).

O teor de umidade médio, em base seca, de cada carbonização realizada e das madeiras utilizadas nos experimentos de secagem, foi obtido a partir de três toras de madeira, por classe de diâmetro, totalizando 9 toras de madeira por enforamento. Das toras de madeira, retirou-se três discos, com 5 cm de espessura, a 25, 50 e 75% do comprimento total. O teor de umidade foi determinado de acordo com a NBR 14.929 (ABNT, 2017).

3.2. Descrição do sistema fornos-fornalha e o sistema de transporte de gases

O sistema fornos-fornalha foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira/UFV, e consiste em um conjunto de quatro fornos circulares acoplados a um queimador de gases central, interligados por meio de dutos (Figura 1A e 1B). Cada forno tem capacidade volumétrica de 1,4 st, aproximadamente 1 m³ de madeira, construído com tijolos maciços cerâmicos, assentados com argamassa de barro. As dimensões internas de cada forno eram de 1,20 metros de diâmetro; paredes com 1,00 metro de altura e flecha de copa de 0,40

metros. Ao nível do solo e do piso, foram feitas quatro aberturas (controladores de ar), cujas dimensões foram de 5 x 5 centímetros, distribuídas uniformemente no perímetro do forno para admissão de ar.

A fornalha para queima dos gases da carbonização é dividida em 2 componentes: a câmara de combustão e a chaminé. A primeira foi construída com tijolos maciços cerâmicos, e uma mistura de argamassa de argila, açúcar e cimento, com parede dupla (20 cm), em formato cilíndrico com dimensões internas de 75 cm de altura e 65 cm de diâmetro. Além disso, foi revestida internamente com manta cerâmica para melhorar o isolamento térmico em relação ao meio externo.

Na lateral da câmara de combustão foi instalada uma janela basculante com dimensões de 40 x 40 cm para alimentação de combustível auxiliar, ignição e manutenção. No centro da base da fornalha foi instalada uma grelha metálica de 15 x 15 cm, responsável pela admissão de ar para o interior da câmara de combustão, advindo de um duto subterrâneo de 15 x 15 cm de altura e largura, além de contar com 75 cm de comprimento.

Após a construção da câmara de combustão, foi feito um estrangulamento, reduzindo o diâmetro interno para 35 cm, aumentando o tempo de residência dos gases na câmara, logo acima se iniciou a construção da chaminé, com diâmetro interno de 50 cm. A chaminé foi construída em alvenaria, com material idêntico ao utilizado para construção da câmara de combustão, em parede dupla e até dois metros de altura, a partir da câmara de combustão, tendo sido também revestida internamente com manta cerâmica.

Os dutos de transporte dos gases da carbonização foram construídos com tijolos maciços cerâmicos e assentados com argamassa de barro. Foram construídos 4 dutos conectando os fornos à fornalha, com dimensões internas de 15 cm de altura por 15 cm de largura e 85 cm de comprimento. Foi instalada uma válvula borboleta para controle da vazão dos gases da carbonização para a fornalha, operada manualmente, localizada no centro do duto a 60 cm da parede do forno.

Neste sistema, dois fornos foram utilizados para carbonização e geração de gases, e outros dois foram utilizados para secagem. Dessa forma, o sistema de transporte de gases foi construído com a finalidade de aproveitar os gases combustos da fornalha, injetando-os nos fornos de secagem (Figura 1C).

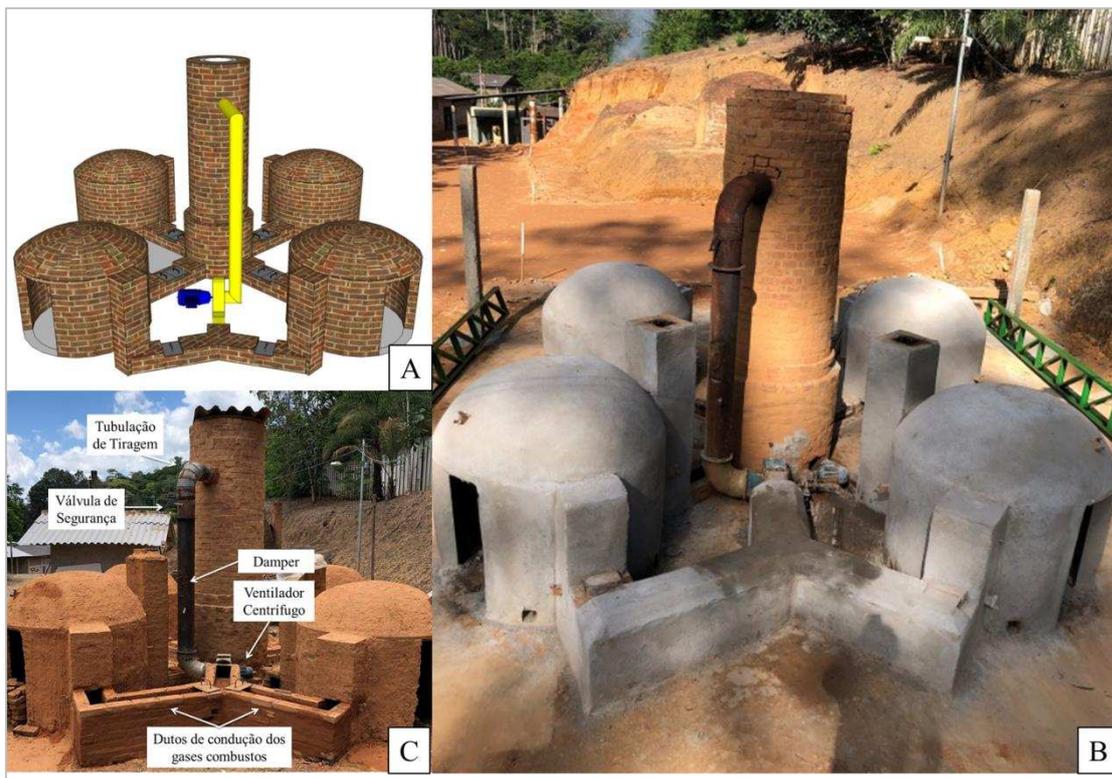


Figura 1 – (A) Representação esquemática do sistema fornos-fornalha adaptado para transporte dos gases combustos do queimador. (B) Implantação do sistema fornos-fornalha adaptado para transporte dos gases combustos do queimador. (C) Componentes do sistema de transporte dos gases combustos.

Os gases gerados na carbonização eram combustos na câmara de combustão e liberados pela chaminé da fornalha na forma de energia térmica. Através de um ventilador centrífugo e tubulações metálicas os gases eram succionados na chaminé e direcionados ao forno de secagem por meio de dutos de alvenaria.

A tiragem dos gases combustos foi realizada na chaminé, a 2,10 metros acima da base da fornalha, por meio de tubulação metálica de 2 mm de espessura e diâmetro interno de 180 mm. Na posição delimitada na chaminé, foi instalada uma tubulação metálica posicionada de modo a formar um ângulo de 90° com o piso da fornalha, com a finalidade de realizar a tiragem dos gases. Logo abaixo desta tubulação, conectou-se outra fabricada em chapas galvanizadas de 2 mm de espessura e 180 mm de diâmetro interno, para efetuar o transporte dos gases combustos até as proximidades do local, em que foi instalado o ventilador centrífugo.

Nessa mesma tubulação, posicionada a 1,80 metros do piso, foi instalada uma válvula de segurança tipo borboleta, para interromper o fluxo de gases combustos, caso fosse necessário, como medida de segurança. Abaixo desta válvula, a 1,5 metros do piso, instalou-

se também um *dampner* (abertura de 12 x 20 cm) com acionamento manual de fechamento para controle da temperatura do gás combusto na entrada do forno de secagem.

O ventilador centrífugo de 0,5 cv de potência e 1800 rpm, foi responsável por promover a sucção dos gases da carbonização e conduzi-los até o forno de secagem. Na saída do ventilador foi conectado um duto em formato “Y”, construído com tijolos maciços cerâmicos e argamassa de barro, com seção quadrangular (15x15 cm), cuja função consistia em direcionar os gases combustos até os fornos de secagem.

No forno de secagem, a injeção dos gases combustos foi realizada através da abertura (15x15cm) posicionada na parede lateral do forno. Os gases combustos, após permearem a carga de madeira do forno de secagem, foram lançados à atmosfera pela chaminé através da pressão positiva exercida pelo ventilador centrífugo.

3.3. Secagem dentro do forno e posterior carbonização da madeira

A obtenção de gases de carbonização para posterior queima e secagem da madeira dentro do forno foi realizada através do método convencional, conforme descrito abaixo.

O carregamento da madeira foi realizado manualmente, com seu arranjo na posição vertical, até um metro de altura, no volume restante, ou seja, na copa do forno, a madeira foi posicionada na horizontal, no sentido porta-fundo. Nas regiões próximas aos controladores de ar, posicionou-se as toras de maior diâmetro (15 cm \pm 3) e, no centro do forno, foram colocadas aquelas de menor diâmetro (9 cm \pm 3), nas demais regiões colocou-se madeiras da classe de 12 cm \pm 3.

Após o carregamento, realizou-se o fechamento das portas com tijolo maciço cerâmico, assentados com argamassa de barro, deixando duas aberturas centralizadas, sendo uma superior e uma inferior para ignição do forno, que foi realizada da seguinte maneira: inicialmente procedeu-se à ignição na câmara de combustão do queimador de gases e, somente depois deste procedimento, deu-se início à ignição do forno de carbonização. Neste, a ignição ocorre na parte superior da porta e, após a consolidação desta etapa, foi fechada a abertura superior, conduzindo à carbonização. Para ambos os procedimentos foram utilizados resíduos lignocelulósicos como fonte de biomassa para queima na ignição.

As carbonizações foram conduzidas monitorando a temperatura na copa do forno, conforme a curva teórica descrita na Figura 2, com pequenas variações de acordo com a umidade inicial da madeira.

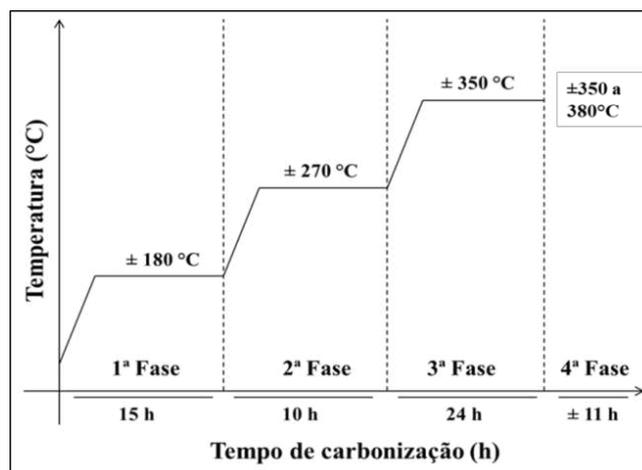


Figura 2 – Curva teórica de carbonização da madeira.

O monitoramento da temperatura do forno foi realizado com auxílio de pirômetro, e o controle por meio da abertura e fechamento dos controladores de ar. O término do processo foi determinado pela chegada da frente de carbonização aos últimos controladores de ar, localizados próximos à saída de gases para o duto que conecta o forno ao queimador de gases.

A finalização do procedimento ocorreu com o fechamento de todos os controladores de ar e do duto de condução dos gases. Foi realizada a aplicação de “barrela” (mistura de terra peneirada com água) para vedação de possíveis trincas e rachaduras do forno, de modo a auxiliar no resfriamento dos fornos.

Os gases gerados no processo de carbonização foram combustos na câmara de combustão da fornalha e transportados até o forno de secagem para o procedimento de secagem artificial da madeira dentro do forno. Anterior a cada procedimento desta etapa, realizou-se a pesagem de toda a carga de madeira para posterior cálculo dos rendimentos gravimétricos.

No forno de secagem, tanto o enforamento da madeira quanto o fechamento do forno foram realizados de forma similar ao utilizado para o forno de carbonização, descrito anteriormente. Após cada procedimento (tempo x temperatura), procedeu-se com o isolamento do sistema de transporte dos gases combustos, fechamento da chaminé de saída dos gases úmidos da secagem e, por fim, conexão do forno à fornalha através do duto de condução dos gases da carbonização.

Em seguida, foi dada ignição no forno, repetindo o procedimento operacional aplicado ao forno de carbonização. A condução do processo de carbonização no forno de secagem se deu a partir da segunda fase da curva teórica de carbonização (Figura 3).

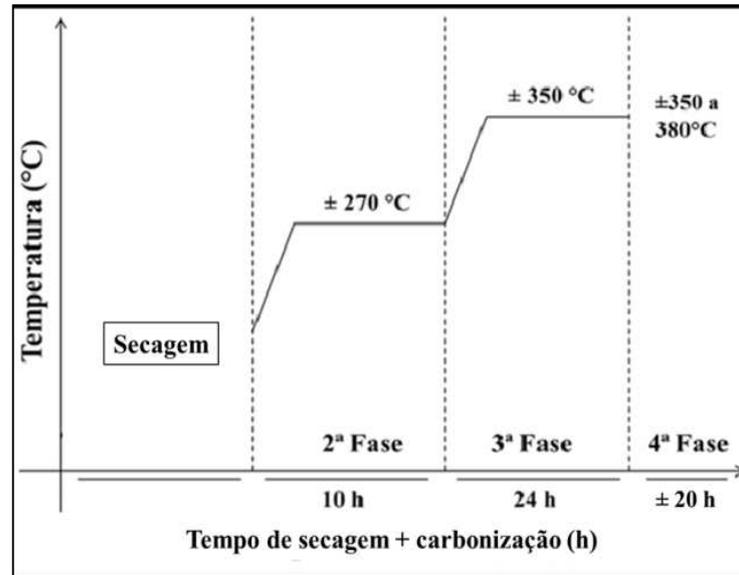


Figura 3 – Curva teórica de secagem e carbonização da madeira.

Todas as atividades de condução do processo de carbonização e fechamento do forno foram semelhantes ao descrito anteriormente. Após o resfriamento dos fornos, quando constatada temperatura inferior a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ na copa, procedeu-se à abertura da porta para o descarregamento do carvão, durante o qual, o carvão vegetal com granulometria inferior a 10,5 mm (finos) foi separado, pesado e ensacado. A madeira parcialmente carbonizada (atiços), também foi separada manualmente e pesada.

Após a quantificação do carvão vegetal, atiço e finos, retirou-se amostras de carvão vegetal para posterior análise. Na Figura 4 observa-se o fluxograma geral do procedimento operacional realizado.

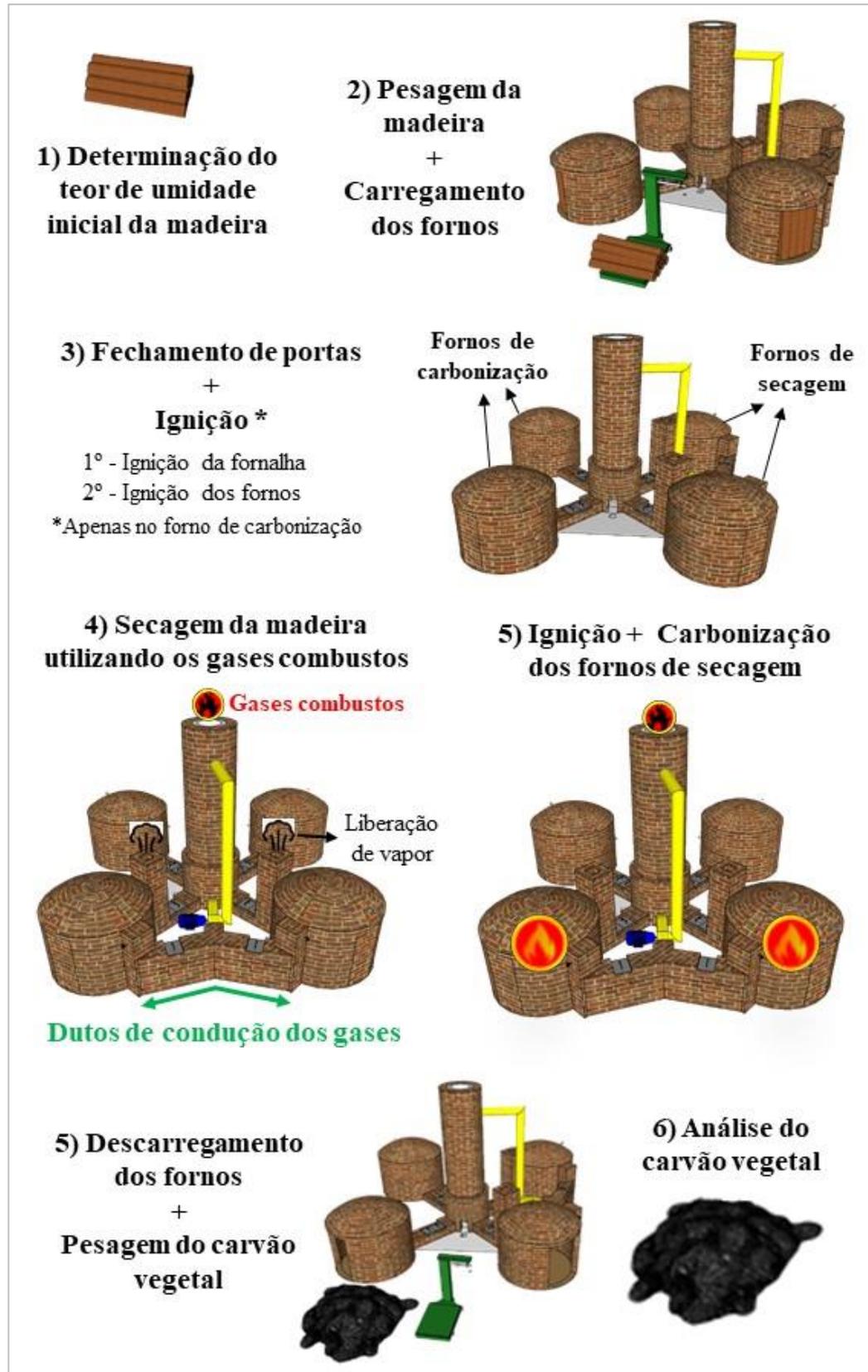


Figura 4 – Procedimento operacional de secagem artificial da madeira dentro do forno seguido de carbonização.

3.4. Perfil térmico do forno de carbonização e do forno de secagem

Nos fornos de carbonização e secagem, foram instalados três poços metálicos (tubos metálicos com fundo fechado) para coleta de temperatura, sendo um localizado na copa e outros dois na parede do forno, a 50 centímetros do solo, posicionados entre os controladores de ar e próximos à saída dos gases. No sistema de secagem, a temperatura foi monitorada no ponto de entrada dos gases no forno de secagem.

Nos poços metálicos, a coleta de temperatura foi realizada utilizando sensor infravermelho de temperatura, pirômetro da marca Minipa, modelo “MT-350”, com intervalo de medição de 30 °C a 550 °C. No ponto de coleta de temperatura dos gases combustos (entrada do forno de secagem), utilizou-se termopares tipo “K” e *datalogger* ICEL, modelo TD-880.

As temperaturas dos fornos de carbonização e fornos de secagem, bem como a dos gases combustos, foram monitoradas e coletadas em intervalos regulares de 1 hora, desde o início de cada tratamento. A partir dos dados, obteve-se o perfil térmico do sistema de secagem da madeira utilizando os gases combustos do queimador.

A fim de avaliar o efeito do tempo de secagem da madeira dentro do forno no ciclo de produção do carvão vegetal, avaliou-se também o tempo total de carbonização. Para tanto, contabilizou-se o tempo gasto para cada tratamento de secagem e o tempo de carbonização, sendo esse considerado até a completa vedação dos fornos.

3.5. Cálculos do rendimento gravimétrico

As massas de carvão vegetal, finos e atíços foram determinadas e o rendimento gravimétrico calculado pelas seguintes equações:

$$RGC = 100 \times \frac{Mc}{Mms} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); Mc = massa seca de carvão vegetal (kg); e Mms = massa seca de madeira (kg).

$$RGF = 100 \times \frac{Mf}{Mms} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: RGF = rendimento gravimétrico em finos (%); Mf = massa seca de finos (kg); e Mms = massa seca de madeira (kg).

$$RGT = 100 \times \frac{Mt}{Mms} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: RGT = rendimento gravimétrico em atíço (%); Mt = massa seca de atíço (kg); e Mms = massa seca de madeira (kg).

3.6. Amostragem e propriedades do carvão vegetal

Após a pesagem do carvão, todos os sacos foram colocados em uma lona, de modo homogeneizado e quarteado; de um quarto retirou-se uma alíquota de 20 litros, para determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal, de acordo com a NBR 6923 (ABNT, 1981).

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS) e composição química imediata, as amostras de carvão vegetal foram moídas e peneiradas, classificadas em peneira de 60 *mesh* e, posteriormente, secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até massa constante, conforme a NBR 6923 (ABNT, 1981).

O PCS do carvão vegetal foi determinado por meio de bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a NBR 8.633 (ABNT, 1983). A determinação dos teores de materiais voláteis (TMV), cinzas (TCz) e carbono fixo (TCF) seguiu os procedimentos preconizados pela NBR 8.112 (ABNT, 1983).

A determinação da friabilidade do carvão vegetal foi realizada por meio do teste da panela (SOARES, 2018). Esta análise consiste em “britar” o carvão vegetal quarteado e peneirar, utilizando a fração retida na peneira de 25,4 mm, em torno de 500 gramas do insumo. Para a realização do ensaio, a massa de carvão vegetal foi adicionada a uma panela de aço com tampa e levada a uma prensa laboratorial, aplicou-se sobre ela a pressão de 1 tonelada pelo tempo de 1 minuto. Em seguida, a pressão foi liberada e realizou-se o peneiramento do carvão vegetal, descartando toda fração inferior a 10,5 mm. Com a massa final, pós-peneiramento, calculou-se a friabilidade conforme equação 5.

$$\% \text{Friabilidade} = \frac{(mi - mf)}{mi} * 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo, mi: massa inicial; mf: massa final, após aplicação de pressão e peneiramento.

3.7. Delineamento experimental

O experimento foi realizado a partir de um delineamento inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial com 2 temperaturas (120 e 150 °C), 3 tempos de secagem (15, 22,5 e 30 horas) e duas repetições. Para efeito de comparação, realizou-se também a carbonização convencional da madeira (testemunha). Vale salientar que as madeiras utilizadas na carbonização da testemunha não passaram pelo processo de secagem dentro do forno, apenas secagem natural.

Os resultados obtidos para rendimentos e propriedades do carvão vegetal foram submetidos ao teste de *Shapiro-Wilk*, para testar a normalidade, e *Bartlett*, para testar a homogeneidade das variâncias.

Foram realizadas duas análises de variância, uma considerando os valores da testemunha, quando observada diferença estatística significativa pelo Teste F, em nível de 5% de significância, os resultados foram submetidos ao teste de Dunnett. Outra, desconsiderando os valores da testemunha e comparando entre os tratamentos com diferentes temperaturas e tempos de secagem, pelo teste F, em nível de 5% de significância, e quando observado efeito significativo entre os tratamentos foi aplicado o Teste Tukey em nível de 5% de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Propriedades da madeira

A madeira utilizada neste estudo possui densidade básica média de 485,8 kg.m⁻³ e relação C/A média de 0,88. Os valores observados estão próximos ao constatado na literatura para clones de *Eucalyptus sp.*, destinados a fins energéticos (ZANUNCIO et al., 2015; COSTA et al., 2017).

Segundo Pereira et al. (2013), a relação C/A tem correlação negativa com rendimento em carvão vegetal, pois madeiras com maior relação C/A têm maior proporção de cerne, o que dificulta a movimentação dos fluídos devido à obstrução dos vasos por tilose. Além disso, Brito et al. (2019) observaram para clones de *Eucalyptus sp.* que, independentemente da idade de corte, o cerne apresenta baixa permeabilidade, encontrando variações entre 0 e 3,9 cm³/cm.atm.s, enquanto para alburno os resultados variaram entre 270 e 400 cm³/cm.atm.s.

Dessa forma, é desejável que madeiras para fins de carbonização sejam formadas por menor relação C/A, visto que esta característica afeta a secagem da madeira, ocasionando aumento na geração de finos no carvão vegetal.

4.2. Parâmetros do processo de secagem da madeira dentro do forno e carbonização

Na figura 5 são apresentadas as variações de temperatura interna do forno de carbonização, coletadas na copa, parede e fundo, durante a carbonização convencional (testemunha), além das faixas correspondentes a cada fase da curva teórica de carbonização.

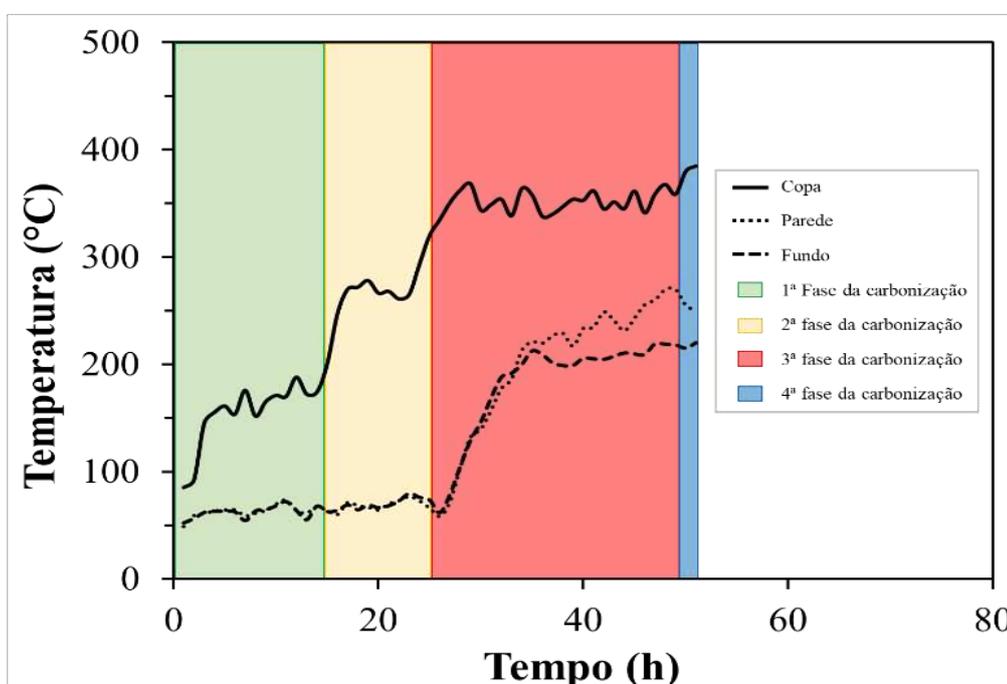


Figura 5 – Temperatura do forno de carbonização.

Observa-se para a carbonização convencional, testemunha, que a temperatura interna do forno ficou próxima à estabelecida pela curva teórica de carbonização, indicando a adequada condução do processo. Nota-se que, após 35 horas de carbonização no forno testemunha, a temperatura média na parede, região central, foi superior à obtida na parede ao fundo, inferindo que a frente de carbonização atinge primeiramente essa região.

Nas figuras 6 e 7 são apresentadas as variações de temperatura interna do forno de secagem, seguido de carbonização, coletadas na copa e paredes. Pode-se observar a indicação das faixas correspondentes a cada fase da curva teórica de carbonização.

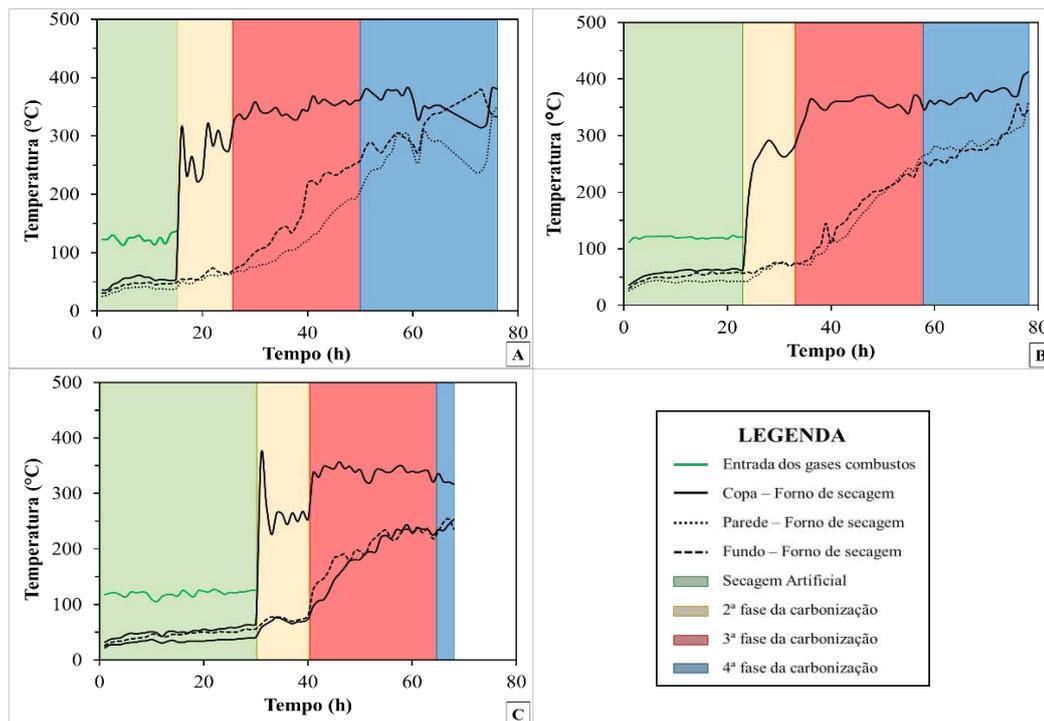


Figura 6 – Temperatura interna do forno em função dos tratamentos de secagem artificial e carbonização da madeira dentro do forno. (A) Secagem a 120 °C por 15 horas + carbonização; (B) Secagem a 120 °C por 22,5 horas + carbonização e; (C) Secagem a 120 °C por 30 horas + carbonização.

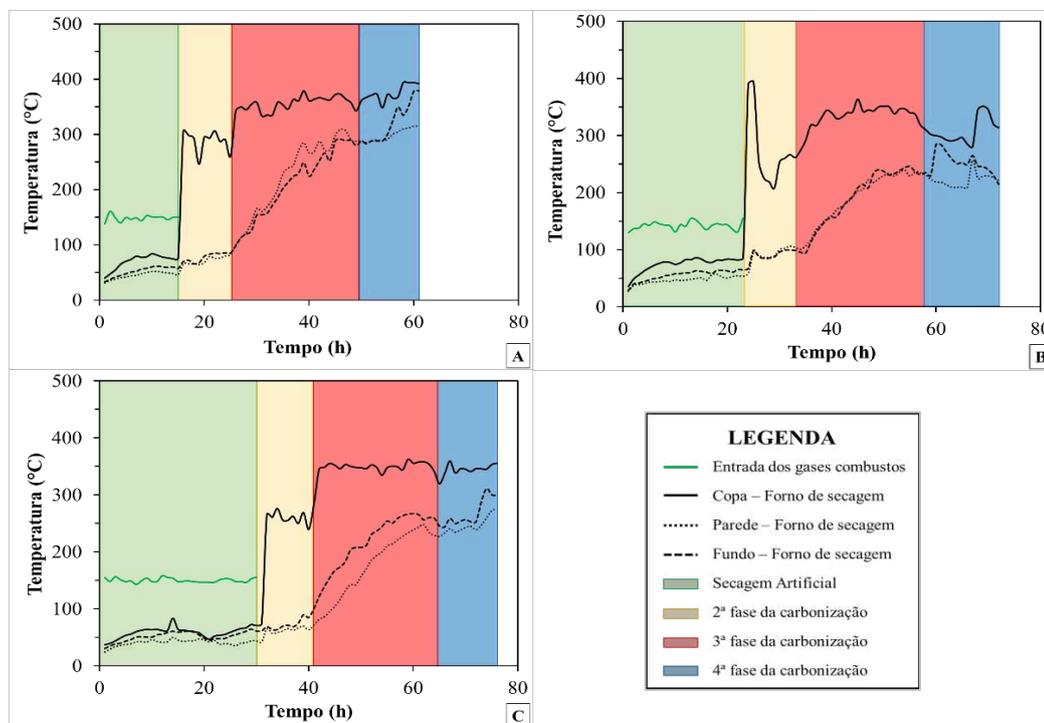


Figura 7 – Temperatura interna do forno em função dos tratamentos de secagem artificial e carbonização da madeira dentro do forno. (A) Secagem a 150 °C por 15 horas + carbonização; (B) Secagem a 150 °C por 22,5 horas + carbonização e; (C) Secagem a 150 °C por 30 horas + carbonização.

De modo geral, para a fase referente à secagem artificial, observa-se que as temperaturas médias do forno obtidas quando se utilizou os gases combustos a 150 °C foram superiores a 120 °C. Em média, para a temperatura de secagem a 120 °C foram observados picos de temperatura correspondentes a 61,6; 65 e 65,45 °C, para os tempos de 15; 22,5 e 30 horas de secagem, respectivamente. Já para a temperatura de secagem a 150 °C, os picos de temperaturas observados corresponderam a 83,8; 86,55 e 87 °C para os tempos de 15; 22,5 e 30 horas de secagem, respectivamente.

Neste sentido, o aproveitamento dos gases combustos em elevadas temperaturas para secagem artificial seguida de carbonização, além de promover a secagem artificial, provoca o aquecimento inicial da carga de madeira e estrutura do forno, podendo refletir em ganhos ao final do processo. Vale ressaltar a necessidade de resfriamento dos gases após a tiragem do queimador, bem como a importância do controle de temperatura e tempo de secagem, devido ao risco de autoignição da carga de madeira enfiada.

Verifica-se, independente do tempo e temperatura avaliados que, ao final do processo de secagem artificial, quando se realizou a ignição dos fornos, houve aumento repentino da temperatura interna, acima da curva teórica. Isso ocorre devido ao processo de ignição, em função da combustão de resíduos lignocelulósicos e de parte da madeira enfiada.

Sobre a carbonização, após a ignição, as temperaturas observadas na copa dos fornos, para os ensaios de secagem seguida de carbonização, estiveram dentro da faixa estipulada pela curva teórica. Isso demonstra que a secagem artificial dentro do forno não interfere no controle do processo.

Nas 3ª e 4ª fases da carbonização, verificaram-se temperaturas superiores na parede do forno quando comparado à testemunha, principalmente na região do fundo. Acredita-se que, devido à inserção dos gases combustos ocorrer em apenas uma lateral do forno, o caminho preferencial tomado por eles provoca maior redução no teor de umidade nesta região e, conseqüentemente, maior troca de calor com a estrutura do forno, resultando em maiores temperaturas durante a carbonização.

O aumento no tempo de secagem, independente da temperatura, reduziu o tempo da 4ª fase da carbonização. Este comportamento pode estar associado ao menor teor de umidade residual ocasionado pelo maior tempo de secagem artificial. Apesar de ser uma etapa fundamental na fixação do carbono, o ajuste na curva teórica de carbonização com tratamento de secagem artificial deve ser levado em consideração.

Na Tabela 1 são mostrados os valores médios do teor de umidade inicial da madeira em função dos tratamentos.

Tabela 1 – Valores médios de teor de umidade inicial, base seca, da carga de madeira enfiada em função dos tratamentos

Tratamento	Umidade da madeira (%)
Testemunha	52,00 c
15h / 120 °C	75,55 a
22,5h / 120 °C	63,13 b
30h / 120 °C	41,00 c
15h / 150 °C	60,09 b
22,5h / 150 °C	42,12 c
30h / 150 °C	56,89 bc

Médias seguidas de mesmas letras não diferem pelo teste Tukey à 95% de probabilidade.

Apesar de estabelecer, inicialmente, que as madeiras fossem enfiadas com teor de umidade médio de 50%, base seca, as condições adversas de campo, principalmente chuva, acarretaram grandes variações nos valores médios. Neste sentido, para o tratamento de 15 horas de secagem a 120 °C foi observado o maior teor de umidade inicial. Salienta-se que este tratamento possui o tempo de secagem artificial idêntico ao estipulado para a testemunha, demonstrando uma avaliação direta do efeito da secagem artificial e da secagem convencional na 1ª fase da carbonização.

Por outro lado, os menores valores de umidade inicial foram observados para a testemunha e os tratamentos de secagem a 120°C por 30 horas e 150 °C por 22,5 horas. Provavelmente estes tratamentos resultarão em maior eficiência de secagem artificial e rendimento em carvão vegetal, visto a menor quantidade de água presente na madeira quando comparado aos demais.

Vale ressaltar que, mesmo com a secagem artificial dentro do forno, a madeira enfiada apresentará determinados teores de umidade residual, influenciando o processo de carbonização. Ao iniciar a carbonização, pós-secagem, ocorre à saída gradual da umidade residual, o que implica diretamente na velocidade da carbonização, aumentando o tempo total do processo.

Na Tabela 2 são mostrados os valores médios do tempo total de carbonização em função dos tratamentos. Nota-se que houve interação significativa entre os tempos e temperaturas de secagem.

Tabela 2 – Valores médios de tempo total de carbonização (h) em função dos tratamentos

Tempo de secagem	Temperatura dos gases combustos		Média
	120 °C	150 °C	
15	76,0 (15 + 51) Aa	61,0 (15 + 46) Cb	68,5
22,5	77,5 (22,5 + 55) Aa	71,5 (22,5 + 49) Bb	74,5
30	68,0 (30 + 38) Bb	76,0 (30 + 46) Aa	72,0
Média	73,8	69,5	71,7
Testemunha	51,0		

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos (em mesma temperatura) e mesmas letras minúsculas entre temperaturas (em mesmo tempo) não diferem pelo teste Tukey. “*” indicam médias estatisticamente iguais à testemunha pelo teste Dunnett, ambos a 95% de probabilidade.

Observa-se para a temperatura de 120 °C, que a secagem por 15 e 22,5 horas apresentaram os maiores valores para tempo total de carbonização, diferindo estatisticamente do tempo de 30 horas de secagem. Este comportamento pode estar associado aos elevados teores de umidade inicial destes tratamentos, conforme observado na tabela 1, implicando num maior teor de umidade residual após o procedimento de secagem dentro do forno e, por consequência, demandando de maior tempo de secagem artificial.

Já para a temperatura de 150 °C nota-se que houve aumento no tempo do ciclo de carbonização em função do aumento no tempo de secagem, sendo o tempo de 30 horas o maior valor médio observado e estatisticamente diferente dos demais. Isto pode estar associado à heterogeneidade da secagem artificial em diferentes regiões do forno, demandando de maior tempo para que ocorra a conversão da madeira em carvão vegetal.

Entre as temperaturas de secagem, observa-se que todos os tratamentos de secagem artificial a 150 °C resultaram em menor tempo total de carbonização quando comparado a 120 °C, exceto para o tempo de 30 horas de secagem. Este comportamento era esperado, devido ao maior fornecimento de energia para retirada da umidade presente na carga de madeira, reduzindo, principalmente, a fase endotérmica (secagem) no processo de carbonização.

Em relação à testemunha (carbonização convencional), foram verificados valores superiores quando comparado ao uso dos gases combustos. Tal tendência era esperada, principalmente nos tratamentos com tempo de secagem artificial superior ao estabelecido pela curva teórica de carbonização. Nota-se aumento médio de 23 horas e 18,5 horas, em relação à testemunha, para os tratamentos de secagem artificial e carbonização realizados nas temperaturas de 120 e 150 °C, respectivamente.

Os tratamentos com 15 horas de secagem, ou seja, mesmo tempo de secagem estabelecido para carbonização convencional (testemunha), tiveram incrementos de 49 e 20 % no tempo total de carbonização, para a secagem artificial utilizando os gases combustos a 120 e 150 °C, respectivamente. Isso ocorreu devido ao elevado teor de umidade inicial (Tabela 1), principalmente quando utilizados os gases combustos a 120 °C.

Apesar do impacto no ciclo produtivo do carvão vegetal, deve-se considerar os possíveis ganhos com a redução do tempo de estocagem da madeira em campo, além do incremento em rendimento gravimétrico, de modo a avaliar o real impacto do tempo de secagem no ciclo de carbonização.

4.3. Rendimentos gravimétrico da carbonização

Na tabela 3 são mostrados os valores médios de rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) em função do tempo e temperatura de secagem dentro do forno, além do observado para testemunha (carbonização convencional).

Tabela 3 – Valores médios do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%) em função dos tratamentos

Tempo de secagem	Temperatura dos gases combustos		Média
	120 °C	150 °C	
15	35.21	36.55	35.88
22.5	36.20	38.84	37.52
30	35.58	39.03	37.30
Média	35.66 b	38.14 a	36.90
Testemunha	31.20		

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas, entre temperaturas, não diferem pelo teste Tukey. “*” indicam médias estatisticamente iguais à testemunha pelo teste Dunnett, ambos a 95% de probabilidade.

Não houve interação significativa entre tempo e temperatura de secagem, apenas efeito isolado da temperatura, tendo maior rendimento gravimétrico as carbonizações realizadas com madeiras secas a 150 °C. Independentemente do tempo de secagem, o rendimento destas carbonizações teve incremento médio de, aproximadamente, 7% em relação ao observado para o mesmo processo realizado com madeiras secas a 120 °C.

Em relação à testemunha, nota-se que todas as carbonizações tiveram maior rendimento gravimétrico, com incrementos variando de 14,30 a 22,25%, quando realizada a secagem dentro do forno a 120 e 150 °C, respectivamente. Isso evidencia o potencial de aproveitamento

dos gases combustos na secagem artificial da madeira para aumento do rendimento em carvão vegetal.

Esses ganhos se devem à menor demanda por energia na etapa de secagem da madeira, visto que essa fase é endotérmica, com grande consumo de parte da carga de madeira enfiada para fornecimento de energia ao processo de carbonização convencional. Além disso, a carga de madeira e o forno encontravam-se aquecidos devido à temperatura de secagem, o que colabora para reduzir o consumo de madeira na ignição e fase endotérmica da carbonização.

Apesar de Skaar (1972) citar que para a retirada de água livre e de adesão se gasta aproximadamente 569 e 829 kcal.kg⁻¹, respectivamente, Cardoso (2015), estudando a secagem artificial da madeira em secador metálico, aproveitando os gases combustos da carbonização, observou que, para cada 1 kg de água removida na secagem artificial, gastou-se, em média, 594,26 kcal. Esse último autor considerou o poder calorífico útil médio da madeira de *Eucalyptus sp.*, com 30% de umidade, igual a 3600 kcal.kg⁻¹, estimando ganhos de 1,5 ponto percentual, ou 4,85% a mais de carvão ao utilizar a madeira previamente seca.

Comparando ao observado no estudo supracitado, o ganho em rendimento gravimétrico na secagem dentro do forno a 120 °C correspondeu à redução média de 14,30 kg de madeira consumida no processo de carbonização, a qual seria usada para fornecimento de energia e retirada da massa de água da carga de madeira. Ao utilizar a temperatura de secagem a 150 °C, a redução do consumo de madeira foi superior, correspondendo a 22,25 kg.

Já Fávero et al. (2007), avaliando a influência de injeção de gases quentes, em fornos retangulares, provenientes da queima de alcatrão misturado com ar atmosférico, observaram ganhos de 5% (22,5 para 27,5%) no rendimento gravimétrico utilizando os gases quentes a 150 °C por 30 horas. Além disso, constataram que a secagem anterior à carbonização reduzira, aproximadamente, 6% do consumo de madeira dentro do próprio forno para fornecimento de energia ao processo de carbonização.

Isso corrobora com o observado neste estudo e demonstra que a secagem dentro do forno remove significativamente a massa de água contida na carga de madeira, disponibilizando maior quantidade de massa seca de madeira para ser convertida em carvão vegetal, aumentando o rendimento gravimétrico. Além disso, o aquecimento da estrutura do forno e da carga de madeira durante a secagem implica diretamente no balanço de energia para início do processo de carbonização, refletindo em aumento do rendimento gravimétrico.

Na tabela 4 são mostrados os valores médios de rendimento gravimétrico em atíço (RGT) em função do tempo e temperatura de secagem dentro do forno, além dos observados para testemunha.

Tabela 4 – Valores médios do rendimento gravimétrico em atíço (%) em função dos tratamentos

Tempo de secagem	Temperatura dos gases combustos		Média
	120 °C	150 °C	
15	10.87 Aa	3.14 Bb*	7.01
22.5	6.91 Ba*	3.61 Bb*	5.26
30	5.54 Ba*	6.09 Aa*	5.81
Média	7.77	4.28	6.03
Testemunha	6.50		

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos (em mesma temperatura) e mesmas letras minúsculas entre temperaturas (em mesmo tempo) não diferem pelo teste Tukey. “*” indicam médias estatisticamente iguais à testemunha pelo teste Dunnett, ambos a 95% de probabilidade.

Houve interação significativa entre os fatores tempo e temperatura de secagem da madeira no rendimento gravimétrico em atíço e, com exceção da secagem artificial de 15 horas por 120 °C, todos os tratamentos foram estatisticamente iguais à testemunha. De modo geral, houve redução da porcentagem de atíços gerados nas carbonizações realizadas com as madeiras secas previamente com o gás combusto a 150 °C quando comparados aos tratamentos utilizando a temperatura de 120 °C, exceto para o tempo de secagem de 30 horas, que foram estatisticamente iguais.

O uso dos gases combustos a 150 °C implica em maior fornecimento de energia para o processo de secagem artificial, reduzindo a massa de água contida na madeira enforada. Dessa forma, devido ao processo avaliado ser auto-térmico, ou seja, o próprio material fornece energia para o sistema, houve menor consumo energético para retirada da água presente no forno, aumentando a conversão da madeira em carvão vegetal. Concomitantemente, espera-se que haja menor quantidade de madeira semicarbonizada como produto da carbonização.

Em relação ao tempo de secagem, observa-se que houve diferenças significativas em relação a cada temperatura avaliada, sendo que o tempo de secagem por 15 horas utilizando os gases combustos a 120 °C apresentou os maiores valores, diferindo estatisticamente dos demais. Estes resultados podem estar associados ao elevado teor de umidade inicial da madeira ($UBS_{inicial} = 75,55\%$ - Tabela 1), o que demandaria maior tempo de secagem para retirada de água da massa enforada.

Já utilizando os gases combustos a 150 °C observa-se maior rendimento em atíço para o maior tempo de secagem, 30 horas, diferindo estatisticamente dos demais. Podem-se associar estes resultados à manutenção do tempo de abertura dos controladores de ar, reduzindo as reações de pirólise em determinadas regiões do forno. Vale ressaltar que este tratamento apresentou maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Em relação à testemunha, observa-se que, em todas as situações, os tratamentos não diferiram estatisticamente, exceto aquele avaliado no tempo de 15 horas de secagem a 120 °C. No entanto, de modo geral, os valores observados estão de acordo com a literatura (OLIVEIRA et al., 2013; DAMÁSIO et al., 2015; DONATO, 2017) e foram considerados baixos, demonstrando que quase toda madeira foi convertida em carvão vegetal, mostrando a adequação e funcionalidade da curva teórica de carbonização utilizada para a condução do processo.

O rendimento gravimétrico em finos de carvão vegetal pode ser observado na tabela 5 em função do tempo e temperatura de secagem dentro do forno, além do observado para testemunha.

Tabela 5 – Valores médios do rendimento gravimétrico em finos (%) em função dos tratamentos

Tempo de secagem (h)	Temperatura dos gases combustos		Média
	120 °C	150 °C	
15	5.18	2.88	4.03 A
22.5	3.08	2.31	2.70 B
30	3.64	3.00	3.32 AB
Média	3.97 a	2.73 b	3.35
Testemunha	3.98		

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos e mesmas letras minúsculas entre temperaturas não diferem pelo teste Tukey. “*” indicam médias estatisticamente iguais à testemunha pelo teste Dunnett, ambos a 95% de probabilidade.

Não houve interação significativa entre os tratamentos, no entanto, foi observado efeito isolado da temperatura de secagem no rendimento gravimétrico em finos de carvão vegetal, havendo menor geração quando se carbonizou as madeiras secas a 150 °C. Observou-se, também efeito isolado do tempo, onde o tratamento de 15 horas de secagem apresentou os maiores valores médios de geração de finos, diferindo estatisticamente dos tratamentos submetidos ao tempo de secagem de 22,5 horas.

A geração de finos é menor quando se utiliza madeira com menor teor de umidade e, em conjunto com a taxa de aquecimento adequada, há a produção de carvão vegetal menos

friável. Devido à água contida na madeira ocupar, principalmente, os espaços intercelulares; durante a carbonização, a saída da água, juntamente com a degradação dos componentes da parede celular, causa a redução do volume ocupado pela madeira dentro do forno, caracterizando a contração do material carbonizado (PEREIRA et al., 2016). Esta, quando ocorre em condições severas, promove o colapso ou a ruptura dos componentes anatômicos, reduzindo a resistência mecânica do carvão vegetal, impactando na geração de finos.

Em relação à testemunha, todos os tratamentos foram estatisticamente iguais, ou seja, a geração de finos não diferiu da carbonização convencional. Além disso, os valores médios observados para todos os tratamentos podem ser considerados baixos. Além da redução do teor de umidade da carga de madeira nos tratamentos de secagem, o baixo valor de geração de finos pode ser atribuído à temperatura das carbonizações não ultrapassarem 400 °C (Figuras 6 e 7), corroborando com o observado na literatura (OLIVEIRA et al., 2013; LANA, 2014; DAMÁSIO et al., 2015).

4.4. Propriedades do carvão vegetal

As propriedades do carvão vegetal estão relacionadas à qualidade da madeira e ao processo de carbonização. Neste estudo não foi verificada interação significativa entre o tempo e temperatura de secagem da madeira na composição química imediata e poder calorífico superior do carvão vegetal, também não foram constatados efeitos isolados das variáveis. Em relação à testemunha, foram observadas diferenças estatísticas dos tratamentos de secagem, pelo teste *Dunnnett* a 95% de probabilidade, conforme pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores médios de algumas propriedades do carvão vegetal em função dos tratamentos e testemunha

Propriedades	120 °C			150 °C			Média	Testemunha
	15h	22,5h	30h	15h	22,5h	30h		
PCS (kcal.kg ⁻¹)	7795,3	8042,6	7835,5	8035,5	7872,7	7888,0	7911,6	7296,5
TMV (%)	17,30	16,49	17,31	16,45	17,96	17,05	17,09	24,40
TCF (%)	82,09	82,92	82,40	82,78	81,31	82,36	82,31	74,68
TCz (%)	0,60	0,59	0,68	0,77	0,67	0,60	0,65	0,92

PCS: poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹); TMV: teor de materiais voláteis (%); TCF: teor de carbono fixo (%); TCz: teor de cinzas (%). “*” indicam médias estatisticamente iguais à testemunha pelo teste *Dunnnett*, a 95% de probabilidade.

De modo geral, os valores de poder calorífico superior encontrados nos carvões produzidos utilizando os gases combustos do queimador para secagem artificial da madeira

foram ligeiramente superiores aos observados na literatura ($\approx 7500 \text{ kcal.kg}^{-1}$). Estes são superiores aos obtidos por Santos et al. (2011) e Zanuncio et al. (2015), e estão diretamente relacionados ao teor de carbono fixo do carvão vegetal.

Os valores médios da composição química imediata diferiram significativamente dos carvões produzidos pelo método convencional (testemunha). Contudo, estudos sobre propriedades da madeira e carvão vegetal para fins siderúrgicos demonstram que é desejável, para o carvão vegetal, valores médios de 20-25%, 75-80% e $< 3\%$ para teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, respectivamente (PEREIRA et al., 2012; PROTASIO et al., 2013; PROTASIO et al., 2014).

De acordo com os dados das propriedades químicas do carvão vegetal, nota-se que, quando se realiza a secagem da madeira dentro do forno, a última etapa da carbonização, ou seja, a etapa de fixação de carbono pode ser reduzida de modo a atenuar o teor de carbono fixo próximo de 75%. Isso diminuirá o tempo de ciclo de produção, o que trará maior competitividade ao sistema proposto. Por consequência, a redução no teor de carbono fixo ocasionará redução nos valores médios de poder calorífico superior dos carvões. No entanto, vale salientar que elevados valores de carbono fixo, estão intrinsecamente relacionados com a friabilidade do carvão.

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios de friabilidade dos carvões vegetais em função dos tratamentos, além do observado para a testemunha. Observa-se que houve interação significativa entre os fatores tempo e temperatura de secagem artificial da madeira e, apenas o tratamento de secagem a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 horas foi estatisticamente igual à testemunha.

Tabela 6 – Valores médios da friabilidade (%) dos carvões em função dos tratamentos

Tempo de Secagem (h)	Temperatura dos gases combustos		Média
	120 °C	150 °C	
15	6.19 Ba	4.89 Ba	5.54
22.5	11.90 Aa	12.50 Aa	12.20
30	10.59 Aa*	5.01 Bb	7.80
Média	9.56	7.47	8.51
Testemunha	9.19		

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre tempos (em uma mesma temperatura) e mesmas letras minúsculas entre temperaturas (em um mesmo tempo) não diferem pelo teste Tukey. “*” indicam médias estatisticamente iguais à testemunha pelo teste Dunnett, ambos a 95% de probabilidade.

De acordo com a classificação do CETEC (1982), os carvões vegetais obtidos neste estudo, independentemente do tratamento, são classificados como pouco friáveis (10-15%) e muito pouco friáveis (8-10%). Observa-se que os carvões produzidos com as madeiras, previamente secas foram menos friáveis, exceto aqueles cuja matéria prima consistiu em madeiras secas à temperatura de 120 °C e 150 °C por 22,5 e 120 °C por 30 horas.

Isto pode estar relacionado à taxa de aquecimento durante a condução do processo de carbonização, forçando a saída da umidade residual da madeira sob pressão, rompendo as estruturas anatômicas e, por consequência, reduzindo a resistência do carvão vegetal. O gradiente de temperatura formado entre a fornalha e o forno acelera a tiragem dos gases, elevando a taxa de aquecimento, impactando diretamente na saída da água da madeira, produzindo, assim, carvão mais friável. Os resultados observados assemelham-se ao rendimento gravimétrico em finos (Tabela 5) e corroboram com o observado por Oliveira et al. (2013) e Damásio et al. (2015).

A carbonização da madeira ocorre da superfície para o interior da tora, e o contrário acontece em relação à saída dos gases do interior da madeira para a sua periferia. Quanto maior o percentual de cerne presente na madeira e maior o seu teor de umidade, de modo geral, menor será a resistência desses carvões, uma vez que o cerne, por ser a região mais impermeável, dificulta a saída da água, gerando pressão e, por consequência, rompimento da parede celular (PEREIRA et al., 2013; DONATO, 2017). Esses fatores podem ter contribuído, juntamente com os parâmetros do processo, para maior friabilidade dos carvões produzidos com madeira secas a 120 °C por 30 horas.

5. CONCLUSÕES

A secagem da madeira dentro do forno seguida de carbonização é viável tecnicamente, uma vez que não interfere neste segundo processo. Além disso, é possível antecipar o uso da madeira, mesmo com maior teor de umidade; no entanto, há redução no ciclo de produção do carvão vegetal.

A secagem a 150 °C promove o aumento no rendimento gravimétrico do carvão vegetal, além de melhor qualidade do produto. O tempo de 22,5 horas também propicia melhores propriedades ao carvão vegetal. Neste sentido, a secagem artificial dentro do forno utilizando os gases combustos a 150 °C por 22,5 horas consiste no tratamento mais recomendado para produção de carvão vegetal.

Vale ressaltar a importância do teor de umidade inicial da carga a ser utilizada. Usualmente, madeiras com maiores teores de umidade demandam maior tempo de secagem artificial, impactando no ciclo produto, no entanto, por consequência, ocasiona melhor rendimento e qualidade do carvão vegetal.

Apesar da viabilidade técnica deste método de secagem artificial, deve-se avaliar a viabilidade econômica e operacional em função do tempo total de carbonização e do baldeio da madeira do campo com maior teor de umidade. Além disso, estudos direcionados a avaliar a qualidade da madeira permitem a obtenção de melhores resultados quando se opta pela utilização deste método. Outro fator passível de avaliação seria o local de inserção dos gases combustos para homogeneização da secagem da madeira dentro do forno.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Sociedade de Investigações Florestais (SIF) e a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo aporte das bolsas de estudos; ao departamento de engenharia florestal (DEF/UFV), a empresa ArcelorMittal e ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) pelo aporte em infraestrutura e desenvolvimento deste estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.941** Madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.929** Madeira - determinação do teor de umidade de cavacos – método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.633** Carvões vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6.923** Carvões vegetal: amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8.112** Carvões vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

BRITO, A. S.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. G. M.; RODRIGUES, B. P.; CARNEIRO, A. C. O.; Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of *Eucalyptus* wood. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.1, 9p. 2019. DOI: <http://doi.org/10.1590/2179-8087.037818>

CARDOSO, M. T.; **Secagem de toras para produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases da carbonização**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). 2015. 74p. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; 2015.

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Séries Técnicas **CETEC**, Belo Horizonte, 393 p. 1982.

COSTA, A. C. S.; LEAL, C. S.; SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; Propriedades da madeira de cerne e alborno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Ciência da Madeira**. Pelotas – RS; v.8, n.1, p.10-20; 2017.

DAMASIO, R. A. P.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; BARCELOS, D. C.; PEREIRA, B. L. C.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, C. M. S.; Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Revista Ciência da Madeira**., v.6; n.1; p.11-22; 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v61p11-22

DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; CANDIDO, W. L.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, C. M. S.; Secagem e perfil de umidade de tora em função do diâmetro e comprimento. **Agroflorestalis News**. v.2, n.2, 2017.

DONATO, D. B.; **Desenvolvimento e avaliação de fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 98p. 2017.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019 – Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 73p., 2020.

EVANGELISTA, W. V.; **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007

FÁVERO, G. C.; VALLE, R. M.; DUARTE, T. M.; Análise térmica de um sistema de combustão de alcatrão em fornos retangulares para secagem da madeira. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA. **Anais**. Cusco – Peru, 8p. 2007.

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

LANA, A. Q.; **Desenvolvimento e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 2014. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2014.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMASIO, R. A. P.; Otimização da produção de carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v.37, n.3, p.557-566, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C.; Correlações entre a relação cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e qualidade do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba – SP, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.

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. **International Journal of Forestry Research**, 8p. 2012. <doi:10.1155/2012/523025>

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C.; Correlações entre a relação cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n.98, p.217-225, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHAES, M. A.; Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria – RS, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

PROTASIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P.; Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo – PR, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013.

PROTASIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. R. S. B.; Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo – PR, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v.39, n.90, p.221-230, 2011.

SINDIFER – Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. **Anuário Estatístico 2020, ano base 2019**. Belo Horizonte, MG: SINDIFER, 26p., 2020.

SKAAR, C.; **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218p

SOARES, J. D.; **Parâmetros para determinar a resistência mecânica de carvão vegetal em prensa hidráulica**. 2018. 45p, Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2018.

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; CARVALHO, A. G.; TRUGILHO, P. F.; Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.41, n.99, p.353-360, 2013.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, E. M. G. C.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; Propriedades energéticas da madeira e carvão de *Corymbia* e *Eucalyptus* em diferentes condições de secagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v.10, n.3, p.432-436, 2015.

CONCLUSÕES GERAIS

O sistema fornos-fornalha adaptado para aproveitamento energético dos gases da carbonização mostrou-se eficiente na secagem artificial da madeira dentro do forno e, também, quando seguida de carbonização. As temperaturas atingidas dentro dos fornos de secagem são superiores às obtidas no método convencional, secagem ao ar livre, e em equipamentos convencionais de secagem artificial da madeira.

A secagem artificial da madeira dentro do forno utilizando os gases da carbonização é viável apenas quando são utilizados os gases da 3ª fase da carbonização. No entanto, quando empregados os gases combustos oriundos do queimador de gases da carbonização, a secagem artificial mostrou-se mais eficiente quando comparado à utilização direta dos gases da carbonização.

A temperatura de secagem de 150 °C e o tempo de secagem de 30 horas é a combinação que apresenta maior eficiência técnica de secagem. Esta mesma combinação promoveu ganhos significativas em rendimento e qualidade do carvão vegetal.

Faz-se necessário avaliar a relação custo-benefício entre ganhos em rendimento e os impactos econômicos na logística da madeira do campo até a unidade de produção de carvão vegetal, visto a antecipação de uso da madeira e o consumo de energia elétrica. Outro fator importante é a adequação da metodologia ao ciclo de produção, sendo necessários ajustes na curva de carbonização quando a secagem artificial da madeira é realizada dentro do forno seguida de carbonização.