

CLARISSA GUSMÃO FIGUEIRÓ

**SECAGEM ARTIFICIAL DE TORETES DE MADEIRA DE EUCALIPTO PARA USO
EM RETORTAS CONTÍNUAS DE CARBONIZAÇÃO**

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*.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira
Carneiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

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

T

F475s
2022

Figueiró, Clarissa Gusmão, 1992-

Secagem artificial de toretes de madeira de eucalipto para
uso em retortas contínuas de carbonização / Clarissa Gusmão
Figueiró. – Viçosa, MG, 2022.

1 tese eletrônica (61 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2022.

Referências bibliográficas: f. 57-61.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.097>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Carvão vegetal. 2. Madeira. 3. Umidade.
4. Carbonização. 5. Calor - Transmissão. I. Carneiro, Angélica
de Cássia Oliveira, 1974-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.98675

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

CLARISSA GUSMÃO FIGUEIRÓ

**SECAGEM ARTIFICIAL DE TORETES DE MADEIRA DE EUCALIPTO PARA USO
EM RETORTAS CONTÍNUAS DE CARBONIZAÇÃO**

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: 04 de março de 2022.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 CLARISSA GUSMAO FIGUEIRO
Data: 08/03/2023 19:56:44-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Clarissa Gusmão Figueiró
Autora

Documento assinado digitalmente
 ANGELICA DE CASSIA OLIVEIRA CARNEIRO
Data: 08/03/2023 20:06:26-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Márlia e Geraldo, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. A Marina pelo carinho e cuidado de sempre.

Ao Lucas, pelo companheirismo e suporte, que nos fortaleceu na nossa vida pessoal e profissional. Obrigada por participar das discussões, conversas e teorias foram concretizadas neste documento. À Nala, que mesmo sem saber, foi fundamental.

À minha família, pelo incentivo e apoio. Em especial, obrigada Tia Mila, Nilson, Sofia, Pedro e Shirley, por participarem do início de tudo isso.

À minha orientadora, Cassinha, que confiou e acreditou no meu trabalho, me ajudou em todas as minhas conquistas, e me apoiou e incentivou nos momentos mais difíceis nestes 10 anos de orientação. Sua inteligência, caráter, carisma e esforço são exemplos para todos nós.

Ao time LAPEM e LPM, que além de suporte as minhas pesquisas e desenvolvimentos bem-sucedidos e malsucedidos, foi um ótimo lugar de acolhida e crescimento pessoal e profissional. Obrigada Miguel, Letícia, Eder, Braw, Mateus, Luciano, Fernanda, Paula, Edna, Chico, Leila, Law, Wellington, por fazerem parte disto, sempre prontamente dispostos em me ajudar.

Ao Mateus Magalhães e Éder, que foram fundamentais na concepção do secador protótipo, na sua execução e início dos ensaios.

Aos Professores de Tecnologia da Madeira (UFV) pelas contribuições nos projetos e seminários. Obrigada Professor Benedito, Ana Márcia, Marcos e Vinícius por todo o suporte.

Ao Fernando Latorre, pela confiança e amizade na execução no estudo de secagem artificial da madeira. Muito obrigada pela ajuda na compreensão dos dados e por compartilhar sua experiência prática.

À estudante Lívia e Lidiane, que foram peças fundamentais na execução do estudo. Obrigada pelo apoio, amizade e disposição.

À Universidade Federal de Viçosa, pela excelente qualidade de ensino e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal.

Aos membros da banca que aceitaram prontamente o convite e pelas contribuições.

A FAPEMIG, CNPQ e a Sociedade de Investigações Florestais (SIF), pela oferta de recursos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A todos, meu respeito, carinho e agradecimento. Obrigada!

RESUMO

FIGUEIRÓ, Clarissa Gusmão, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2022. **Secagem artificial de toretes de madeira de eucalipto para uso em retortas contínuas de carbonização**. Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

A utilização de toretes de madeira, com variados e elevados teores de umidade, é um dos fatores limitantes para produtividade e estabilidade de reatores contínuos de carbonização. Como alternativa aos problemas decorrentes ao teor de umidade dos toretes, a utilização de secadores de madeira pode significar uma adequação e homogeneidade do teor de umidade da matéria-prima lenhosa, de maneira rápida e de forma controlada, garantindo melhor eficiência do processo e qualidade do carvão vegetal, o que auxilia na consolidação desta tecnologia, uma vez que no mercado e na literatura, dados de sistemas de secagem para toretes de madeira são escassos, tendo na sua maioria, para secagem de partículas e cavacos. Logo, a presente tese de doutorado objetiva fornecer subsídios teóricos para auxiliar no desenvolvimento de um secador industrial para secagem de madeira, na forma de toretes, para serem utilizados em sistemas contínuos de carbonização. Para isto, foi projetado e construído um sistema de secagem de toretes de madeira em escala experimental do tipo leito fixo, para a avaliação das variáveis da madeira e do processo de secagem, a saber: o layout de corte (40 cm de comprimento, 20 cm de comprimento e rachada); classe de diâmetro (>12 cm, 12,1 – 14, 14,1 – 16 cm e 16,1 – 18 cm); e tempo de residência da madeira no reator de secagem (30, 60, 90 min) em temperaturas de 300°C. Os toretes “rachados” independente do diâmetro, aqueceram mais, tanto na região do cerne quanto do alburno, principalmente nos maiores tempos de residência de secagem, quando comparados aos demais layouts de corte. A melhor transferência de calor deste layout de corte, propiciou uma maior taxa de secagem e perda de umidade, que por sua vez, impactou diretamente sua eficiência de secagem. Em relação a ocorrência de ignição durante as secagens, os toretes rachados e de os 20 cm de comprimento, quando submetidas ao programa de secagem de tempo de residência de 90 min, entraram em combustão no secador, demonstrando que, nas condições aplicadas no presente estudo, este é o limite de trabalho para tais layouts de corte.

Palavras-chave: Água na madeira. Tecnologia de carbonização. Transferência de calor. Produção de carvão vegetal.

ABSTRACT

FIGUEIRÓ, Clarissa Gusmão, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2022. **Artificial drying of eucalyptus short wood logs for use in continuous carbonization retorts**. Adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

The use of short wood logs, with varied and high moisture contents, is one of the limiting factors for the productivity and stability of continuous carbonization reactors. As an alternative to the problems arising from the moisture content of the short logs, the use of wood dryers can mean an adequacy and homogeneity of the moisture content of the raw material, in a fast and controlled way, guaranteeing better process efficiency and charcoal quality, which helps in the consolidation of this technology, since in the market and in the literature, data on drying systems for short wood logs are scarce, mostly for drying particles and chips. Therefore, this doctoral thesis aims to provide theoretical support to assist in the development of an industrial dryer for drying wood, in the form of short logs, to be used in continuous carbonization systems. For this, a drying system for short wood logs was designed and built on an experimental scale, of the fixed bed type, to evaluate the variables of the wood and the drying process, namely: the cutting layout (40 cm long, 20 cm long and cracked); diameter class (>12 cm, 12.1 – 14, 14.1 – 16 cm and 16.1 – 18 cm); and wood residence time in the drying reactor (30, 60, 90 min) at temperatures of 300°C. The “cracked” short logs, regardless of the diameter, heated up more, both in the heartwood and sapwood regions, especially in the longer drying residence times, when compared to the other cutting layouts. The better heat transfer of this cutting layout provided a higher drying rate and moisture loss, which in turn directly impacted its drying efficiency. Regarding the occurrence of ignition during drying, the cracked logs and the 20 cm long logs, when submitted to the drying program with a residence time of 90 min, combusted in the dryer, demonstrating that, under the conditions applied in the present study, this is the working limit for such cutting layouts.

Keywords: Dissertation. Water in the wood. Carbonization technology. Heat transfer. Charcoal production.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1. Secagem da madeira no setor de carvão vegetal	12
2.1.1. Produção de carvão vegetal	12
2.1.2. Sistemas de produção de carvão vegetal	14
2.1.3. Impacto da umidade da madeira na produção e qualidade do carvão vegetal	18
2.1.4. Secagem artificial da madeira na produção de carvão vegetal.....	21
2.2. Potencial de utilização da secagem artificial em sistemas contínuos de carbonização.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1. Desenvolvimento e construção do sistema de secagem artificial da madeira	27
3.2. Secagem artificial da madeira	29
3.3. Perfil de umidade	32
3.4. Monitoramento de temperatura e vazão	33
3.5. Taxa de secagem.....	34
3.5. Eficiência energética da secagem.....	34
3.6. Área de madeira disponível para contato com o gás combusto.....	36
3.7. Análise de dados.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1. Perfil térmico do sistema de secagem	39
4.1. Perfil térmico da madeira nas regiões de cerne e alburno	41
4.2. Perda de umidade da madeira e taxa de secagem	46
4.3. Perfil de umidade	49
4.4. Eficiência da secagem	53
5. CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

O teor de umidade da madeira é uma variável crítica na produção de carvão vegetal. Inadequações em seus valores podem resultar em perdas de produtividade e eficiência do processo de carbonização, aliado a perdas na qualidade do carvão vegetal e aumento da emissão atmosféricas (1, 2, 3, 4, 5). Desta forma, a redução e controle do teor de umidade é um dos principais desafios dos empreendimentos florestais do setor, estando presente até mesmo em umas das exigências da Deliberação Normativa 227 (6), documento este que estabelece procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal (7, 8, 9, 10). A secagem da madeira, neste sentido, torna-se uma etapa fundamental na cadeia produtiva do carvão vegetal.

A secagem da madeira pode ser realizada de forma natural ou artificial. Embora a secagem natural seja considerada uma forma de redução de umidade de baixo custo e de fácil execução, este método tem algumas desvantagens. Devido ao longo período em que a madeira é estocada em campo (90 a 150 dias), é necessário que um elevado volume de madeira seja estocado em campo, o que representa um capital imobilizado sem geração de receita. Outro aspecto importante a ser considerado é que, dependendo das condições do ambiente, que podem prolongar o período de secagem ou de oscilações na demanda de produção de carvão vegetal, torna-se necessário a utilização de madeiras acima dos teores recomendados de umidade (30 a 40%), o que causa impactos negativos no processo de carbonização e qualidade do carvão (11, 12).

Logo, a secagem artificial da madeira torna-se uma alternativa interessante a ser considerada pelas empresas produtoras de carvão vegetal, uma vez que propicia uma melhor eficiência e controle das variáveis de secagem. De forma incipiente e aplicada em escala experimental ou piloto, na literatura estão disponíveis algumas iniciativas de secagem artificial, voltadas para produção de carvão vegetal, como as desenvolvidas por Cardoso (11), Oliveira *et al.* (13) e Figueiro *et al.* (14). Embora tais projetos de secagem artificial da madeira sejam de extrema relevância para o setor de carvão vegetal e contribuam para o conhecimento atual sobre este tema, faz-se necessário o melhor entendimento da secagem em alta temperatura da madeira, em toras, bem como o desenvolvimento de secadores, de forma a elucidar de forma mais

abrangente o potencial desta técnica e suas limitações, principalmente para atendimento as retortas contínuas de produção de carvão vegetal.

As retortas contínuas de carbonização são consideradas como um dos sistemas mais promissores de carbonização, que além do carvão vegetal, permite um aproveitamento eficiente dos gases tanto condensáveis quanto não condensáveis resultantes do processo, sendo essa já uma técnica consolidada no Brasil (15, 16, 17, 18). Logo, inovações no modelo tradicional de produção de carvão vegetal, baseadas no conceito de aproveitamento eficiente dos produtos gerados no processo, contribuem para a sustentabilidade e competitividade do setor, por meio de uma produção de forma racional e otimizado, acompanhado de ganhos na qualidade, logística e produtividade.

Assim, a implementação de tecnologias de secagens artificial inseridas na produção de carvão vegetal em retortas contínuas, que utilizam toretes de madeira, ou seja, toras de menores dimensões, podem significar melhor homogeneidade e redução do teor de umidade médio da madeira, visto que nos sistemas contínuos o tempo de residência e a taxa de aquecimento são mantidos ao longo da descida da madeira no reator. Logo, a homogeneização deste parâmetro é essencial para a eficiência do processo e qualidade do carvão vegetal produzido.

Acredita-se que os estudos de secagem de toretes de madeira, em alta temperatura, podem contribuir para aumentar a eficiência das retortas contínuas, por meio do aproveitamento da energia térmica residual do processo, de forma a auxiliar na consolidação desta tecnologia no mercado, além de maior visibilidade para o setor de carvão vegetal.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a secagem artificial em altas temperaturas de toretes de madeira, em diferentes layouts de corte, para utilização em retortas contínuas de produção de carvão vegetal. Os objetivos específicos foram analisados em função do diâmetro da madeira e do tempo de residência:

- I. Projetar e construir um protótipo de secador para secagem artificial de toretes de madeira, em alta temperatura;
- II. Obter os perfis térmicos do secador em função dos tratamentos de secagem da madeira em toretes;
- III. Obter os perfis de temperatura, no sentido radial da madeira, durante o tempo de secagem;

- IV. Avaliar o efeito do diâmetro das madeiras e do tempo de residência na redução do teor de umidade após a secagem a alta temperatura, de modo, obter a eficiência de remoção de água;
- V. Determinar a eficiência energética da secagem;
- VI. Avaliar o perfil de umidade após a secagem artificial dos toretes em função dos tratamentos realizados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Secagem da madeira no setor de carvão vegetal

A produção de carvão vegetal apresenta potencial de crescimento no Brasil e no mundo, seja para uso siderúrgico ou para outras aplicações. No entanto, para que a sustentabilidade produtiva e competitividade na produção de carvão vegetal seja alcançada, é necessário que ocorra um aprimoramento dos seus sistemas de produção e do controle de maior dos parâmetros que influenciam a carbonização.

A umidade da madeira é um dos parâmetros que, atualmente, mais afeta a produção de carvão vegetal, seja a nível industrial ou doméstico. A secagem, portanto, é uma etapa fundamental para solucionar ou minimizar os diversos problemas produtivos decorrentes da carbonização de madeiras com elevados teores de umidade.

A secagem artificial, é uma alternativa para minimizar as desvantagens decorrentes da secagem natural, entretanto, os projetos e/ou iniciativas neste tema voltados para produção de carvão vegetal ainda são incipientes e em escala experimental. Nesta parte da revisão, para fundamentar a discussão sobre o potencial da secagem artificial da madeira em retortas contínuas, está apresentado aspectos relevantes do contexto da produção de carvão vegetal e da secagem da madeira neste setor.

2.1.1. Produção de carvão vegetal

O carvão vegetal é obtido por meio de um processo termoquímico de conversão da biomassa vegetal, a carbonização. Tal processo ocorre quando o material é submetido a baixas taxas de aquecimento, em condições de atmosfera com limitação total ou parcial de oxigênio, e temperaturas finais de 300 a 500 °C. Assim, a carbonização tem como principal produto, um sólido rico em carbono, o carvão vegetal, embora também sejam produzidos gases condensáveis e não condensáveis (19, 20, 21, 22, 23).

As aplicações do carvão vegetal podem ser diversas e contemplam desde sua utilização como fonte de energia, a agente termoreductor ou reductor de minério de ferro, matéria-prima para produção de carvão ativado e gás de síntese, fabricação de nanotubos, condicionantes de solo etc. (24, 25, 26, 27, 28). Embora o carvão vegetal apresente grande versatilidade de utilização em diversos segmentos industriais, as

regiões globais, de acordo com suas características de mercado e nível de industrialização, o utilizam de forma distinta.

Os maiores produtores e consumidores de carvão vegetal no mundo, por exemplo, estão localizados na África Subsaariana, com a produção correspondente a 65 % do volume global (29). Nesta região, o carvão vegetal é utilizado em mais de 80% das residências como fonte de energia para cocção de alimentos (30). A importância do carvão vegetal na África Subsaariana é expressiva, em que sua utilização é atribuída a vantagens para o balanço energético destes países, além de representar relevante fonte de renda para produtores rurais e contribuir para redução da dependência de importações de combustíveis ou tecnologias onerosas de produção de energia (31, 32).

Em contraste a África Subsaariana, que utiliza o carvão vegetal para aplicação doméstica, na cocção de alimentos, o Brasil se destaca pela utilização em larga escala desta matéria-prima em processos industriais (33, 21). O Brasil é responsável por 12% da produção global de carvão vegetal (29), sendo direcionada, principalmente, para suprir a demanda da indústria siderúrgica, onde desempenha a função de redução do minério de ferro e/ou fonte de energia para fabricação do ferro-gusa, ferro-liga e aço.

No Brasil, 30% das indústrias siderúrgicas utilizam o carvão vegetal como redutor, em detrimento ao coque (34). O carvão vegetal, na sua forma granular e moída, é utilizado como redutor e fonte de energia em mini alto fornos. Já nos alto fornos a coque, a utilização do carvão vegetal na forma granular é viável apenas de forma parcial. De acordo com Norgate *et al.* (35) é possível a substituição de aproximadamente 20% do coque para carvão vegetal, devido, principalmente, as propriedades físico-mecânicas do carvão vegetal, aliado a sua alta reatividade (33, 21).

Assim, embora a participação do carvão vegetal como termorredutor ou redutor seja menor que a do coque em processos siderúrgicos brasileiros, esta substituição, representa benefícios ambientais, econômicos e sociais para este setor.

As florestas plantadas de *Eucalyptus sp.* são a principal matéria prima para produção de carvão vegetal, sendo que no período de 2014 a 2021, esta participação cresceu de 85% para 95% (36). Esta tendencia confirma a redução do uso de florestas naturais para produção deste insumo, o que pode contribuir para ganhos em conservação e preservação de biodiversidade.

Além disto, o caráter renovável do carvão vegetal faz com que sua utilização favoreça a diminuição de gases de efeito estufa gerados ao longo da cadeia produtiva do ferro-gusa, ferro-liga e aço (em comparação a utilização do coque). Durante o desenvolvimento das florestas cultivadas para produção de carvão vegetal, ocorre captação de CO₂ para realização de funções essenciais dos organismos vegetais, o que contribui positivamente para que o balanço de carbono final do processo siderúrgico (37, 35).

Outro aspecto importante do carvão vegetal é que durante sua utilização não ocorre emissão de óxidos de enxofre, que são gases danosos ao ambiente, como ocorre para o carvão mineral e derivados. Uma vez que a madeira possui baixos teores deste componente elementar, esta emissão será minimizada drasticamente (38, 39, 40).

Em relação aos aspectos econômicos e sociais associados a produção de carvão vegetal, de acordo com o IBA (41), em 2018, mais de 130 indústrias utilizaram o carvão vegetal em seus processos, gerando empregos diretos e indiretos para diversas comunidades onde estão inseridas esta atividade. Neste sentido, observa-se que a produção de carvão vegetal pode estar vinculada a melhoras em índices de desenvolvimento humano e renda de diversas regiões.

No entanto, apesar das vantagens apresentadas na utilização do carvão vegetal e do potencial de crescimento da sua produção no Brasil e no mundo, seja para uso siderúrgico ou para outras aplicações, alguns aspectos relacionados a sua produção necessitam ser aprimorados ou desenvolvidos objetivando a sustentabilidade produtiva e maior competitividade no mercado (33, 21). Dentre tais aspectos, destacam-se aqueles associados aos sistemas de produção de carvão vegetal e ao controle dos parâmetros do processo.

2.1.2. Sistemas de produção de carvão vegetal

A maior parte da produção brasileira de carvão vegetal, cerca de 70%, é realizada em modelos de produção caracterizados pelo baixo nível tecnológico e mecanização, apresentando baixa capacidade de produção, além de baixo rendimento gravimétrico em carvão. De forma geral, a utilização destes modelos é associada ao pequeno e médio produtor, que destinam o carvão vegetal, em sua maioria, para a produtores independentes de ferro gusa. Sendo que, fatores como controle ineficiente dos parâmetros da carbonização e a emissão atmosféricas dos

gases gerados no processo ainda são aspectos negativos encontrados na utilização de tal modelo (33, 42, 43).

Contudo, nos últimos anos, esforços voltados para melhorias produtivas para o pequeno e médio produtor de carvão vegetal tem sido desenvolvido e implementado, buscando uma melhor adequação em relação a tecnologia dos fornos e acompanhamento do processo de carbonização, assim como emissões de gases de efeito estufa. As universidades apresentam papel fundamental neste horizonte de mudança e aprimoramento da produção de carvão vegetal em modelos de baixa nível tecnológico. O desenvolvimento de tecnologias como o sistema forno-fornalha, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa, que visa a produção de carvão vegetal com baixa emissão de poluentes e maximização do rendimento gravimétrico, tem representado um grande avanço para a sustentabilidade do setor (44, 45, 46, 47). Além disto, a disseminação de cartilha as técnicas, publicações, ou capacitações referentes a construção, instrumentação dos fornos e controle das variáveis do processo auxiliam a redução do empirismo do processo.

Outra iniciativa importante implementada é o Projeto Siderurgia Sustentável, que baseado nos conceitos dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), tem como objetivo proporcionar base tecnológica e capacitação humana, além de unidades de produção comercial, para fomentar a utilização de um modelo de produção sustentável de carvão vegetal (48).

Em relação a produção em larga escala de carvão vegetal, os modelos atualmente utilizados foram desenvolvidos para permitir um alto grau mecanização, contemplando fornos de elevada capacidade de produção e tecnologias de maior controle das variáveis do processo, o que tem garantido ganhos expressivos em aspectos produtivos (49).

O modelo de produção em que são utilizados fornos retangulares, construídos em alvenaria de tijolo cerâmicos e estrutura de concreto armado, são os principais empregado pelas grandes empresas deste setor (33). Segundo MMA (50), a utilização dos fornos retangulares propiciou um aumento da capacidade de enforamento de madeira de 7 m³ a 70 m³ (forno tipo rabo quente e fornos circulares de sete metros de diâmetro, respectivamente), para 150 m³ a 450 m³ (FR190 e RAC700, respectivamente).

Dentre os principais avanços nestes modelos que utilizam fornos retangulares, destacam-se também a presença de sistemas supervisórios de

monitoramento da temperatura para realização de intervenções nos fornos. De acordo com MMA (50), o uso de softwares de gerenciamento do processo resultou em um aumento do rendimento gravimétrico de 26% para 32 a 35%. Além disto, os sistemas supervisórios permitem um uso eficiente das informações coletadas em sistemas, seja para criação de curvas de carbonização específicas de acordo com as condições da madeira (teor de umidade e material genético), ao desenvolvimento de projetos de automação em partes do processo.

Em relação a emissão de gases atmosféricos gerados durante a carbonização da madeira, queimadores de gases estão sendo desenvolvidos e aprimorados. De acordo com Pereira *et al.* (21), a utilização de um queimador acoplado nas plantas de carbonização pode significar, dependendo do tipo de câmara de combustão, uma redução de até 80% do metano produzido no processo, além de produzir energia térmica, que por sua vez pode ser utilizada para cogeração de energia elétrica ou ser direcionada para sistemas de secagem. No entanto, segundo os mesmos autores, a tecnologia de queima de gases ainda não abrange toda a cadeia produtiva, devido, principalmente, a fatores técnicos e financeiros, portanto, são necessários o desenvolvimento de mais estudos para aprimorar a tecnologia existente, viabilizando o seu uso para produção de energia térmica e eletricidade.

Assim, apesar das melhoras significativas no rendimento gravimétrico e na capacidade produtiva, aliado aos constantes esforços para um melhor controle do processo e minimização das reduções das emissões atmosféricas, a utilização de fornos retangulares, em na produção em larga escala, apresentam algumas desvantagens, em que pode-se destacar a alta variabilidade do produto final, exigência de um plano de manutenção efetivo para a estrutura do forno e impedir rachaduras, alta geração de finos, longo ciclo de resfriamento (7, 33).

Neste contexto, objetivando alternativas de melhoria e otimização do processo de carbonização, tecnologias de carbonização foram desenvolvidas como alternativa a alvenaria. A tecnologia de fornos container Rima (FCR), fornos Bricarbras e Tecnologia Drying, Pyrolysis, Cooling (DPC), retorta contínua CARBOVAL e ONDATEC são exemplos destes sistemas, que, de forma geral, apresentam um alto grau tecnológico, possibilitando um maior controle da carbonização, o que resulta em rendimentos gravimétricos que variam de 33 a 38%, e conseqüentemente uma menor emissão de gases atmosféricos. Dentre as limitações que impedem sua consolidação

no mercado, pode-se citar o alto custo de implantação e operação destes projetos e ausência de plantas operando em larga escala (33, 50).

De acordo com CGEE (51), dentre tais tecnologias alternativas, tecnologias de carbonização contínua, em retortas, é um dos métodos mais eficientes de produção de carvão vegetal. As primeiras retortas contínuas surgiram há mais de 50 anos e originalmente tinham o objetivo de produzir alcatrão vegetal para uso energético e abastecimento da indústria química, em países da Europa e Oceania. Atualmente, é utilizada para produção de carvão vegetal, para uso doméstico (França e Polônia) e na indústria de ferro-ligas (Austrália). No cenário brasileira, a ArcelorMittal, nos anos de 1987 a 1993, foi a pioneira em utilizar esta tecnologia para produção de carvão vegetal para uso siderúrgico. Para o mesmo propósito, a Vallourec Florestal, em 2008, iniciou o desenvolvimento da tecnologia Carboval, que opera atualmente em escala piloto.

A retorta contínua Carboval é constituída por reator cilíndrico metálico, disposta verticalmente e acoplada a um sistema de combustão de gases e coleta de gases condensáveis (alcatrão e extrato pirolenhoso). Assim, a madeira, nas dimensões de 20 a 40 cm de comprimento é inserida na porção superior do forno, onde, ao longo da porção vertical, a mesma percorre gradativas zonas de temperaturas, em contracorrente com os gases gerados no processo. Ao final do processo, na porção basal do reator, é retirado do carvão vegetal (15, 16, 17, 18).

Em relação aos gases produzidos, estes têm uma função de fornecimento de energia térmica para o sistema. Para isto, estes são recolhidos na parte superior do forno, sendo divididos e direcionados para duas rotas diferentes e sinérgicas. A primeira rota consiste em uma massa circulante que é aquecida indiretamente e injetada na base da zona de pirólise para fornecimento de energia para o reator. O restante dos gases é conduzido para um queimador, de forma a garantir que todo o gás seja queimado de forma super-estequiométrica, visando evitar a emissão de gases nocivos ao meio ambiente, como o metano e o monóxido de carbono. Esse gás combusto é responsável pelo aquecimento, de forma indireta, da massa recirculante que fornecerá energia para que a pirólise ocorra. Excedentes tanto nos gases produzidos pela pirólise, quanto de gases combusto no sistema, ocorrem neste sistema contínuo, o que possibilita a inserção de estruturas de cogeração de energia elétrica e secagem de madeira (15, 16, 17, 18).

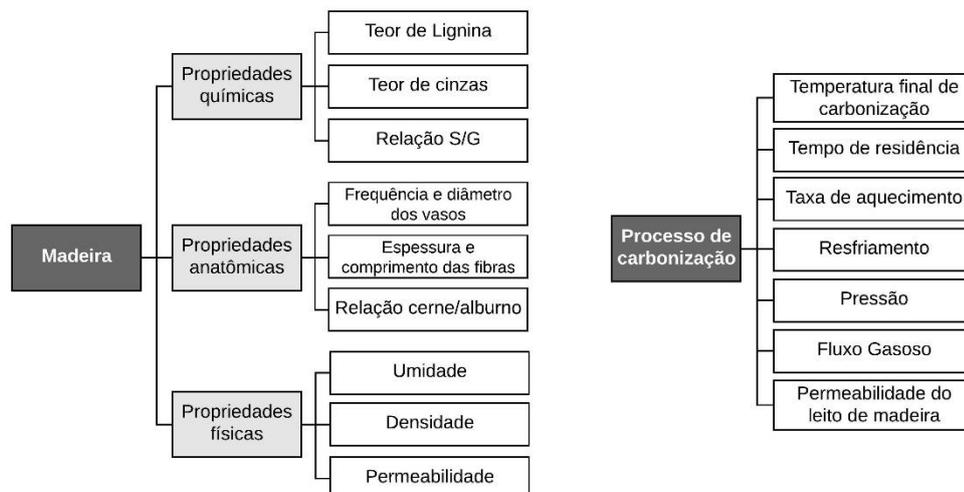
Deste modo, para a sustentabilidade das empresas de carvão vegetal, setor que apresenta grande relevância econômica e social no Brasil, é necessário que inovações no modelo tradicional de produção aconteçam. Tais renovações estão baseadas no conceito de que, sem o uso múltiplo dos produtos da pirolise lenta, que propicia diversificação de mercado e aumento da competitividade do carvão vegetal, ainda irá ser desperdiçado um grande montante de energia para o ambiente, sem nenhum tipo de aproveitamento. Ainda, é importante considerar o impacto ambiental e social causado pela emissão dos gases ao ambiente, que tem resultado em prejuízos e fechamentos de unidades produtivas de carvão vegetal. Além disto, se o uso múltiplo dos produtos da carbonização for acompanhado de ganhos na qualidade, logística e produtividade do produto principal, é inevitável a transição para este cenário (52, 53). Assim, o desenvolvimento de iniciativas como a Carboval pode auxiliar para uma transição do modelo de produção de carvão de forma racional e otimizado, que garante evolução de competitividade e produtividade para a presente empresa.

2.1.3. Impacto da umidade da madeira na produção e qualidade do carvão vegetal

Na produção de ferro-gusa, ligas-metálicas e aço, é desejável que o carvão vegetal, como matéria-prima, tenha características adequadas para desempenhar as funções de redução, fornecimento de energia para o sistema e sustentação da carga de minério, exigidas durante o processo siderúrgico. Além disto, é necessário que tais características sejam uniformes, uma vez que a eficiência das operações siderúrgicas está diretamente relacionada a padronização desta matéria-prima. No entanto, é comum que ocorram recorrentes oscilações na qualidade do carvão vegetal fornecidos pelas empresas produtoras.

A qualidade do carvão vegetal pode ser influenciada por diversos fatores (Figura 1), sejam eles inerentes a madeira ou ao processo de carbonização. Assim, o controle destes parâmetros é uma ação fundamental para a eficiência da carbonização e diminuição na ocorrência de desvios de qualidade do carvão.

Figura 1 - Principais fatores relacionados a madeira e ao processo de carbonização que influenciam na qualidade do carvão vegetal. Fonte: Elaboração própria



Dentre os principais desafios dos empreendimentos florestais relacionados a qualidade do carvão vegetal, seja em modelos rudimentares ou de alto nível tecnológico, destaca-se a adequação do teor de umidade da madeira a ser utilizada (1, 14, 54).

A carbonização da madeira quando realizada com materiais que apresentam elevados teores de umidade está associada a prejuízos na eficiência do processo, o que resulta em perdas de produção e produtividade dos fornos/reactores (14). Além disto, impactos nas características mecânicas do carvão vegetal e maior emissão de gases danosos ao ambiente são observados.

Durante a carbonização de madeiras com elevados teores de umidade, parte da energia disponível no processo é direcionada para a evaporação da água presente na madeira, o que resulta em uma diminuição da taxa de transferência interna de calor na madeira (55, 56, 57). Segundo Diego *et al.* (58), a taxa de desvolatilização da madeira úmida pode ser três vezes menor que a da madeira seca. Assim, consequentemente, um maior tempo de residência da madeira no processo será necessário, o que significa um ciclo de carbonização de maior duração, o que implica em perdas em rendimento e produtividade (4).

Alterações nas propriedades mecânicas do carvão vegetal são também observadas na carbonização de madeiras com elevados teores de umidade. As pressões e tensões mecânicas ocasionadas pela liberação rápida de gases e vapores de água, podem propiciar a formação de trincas no carvão vegetal (56, 59, 60; 61).

Assim, o carvão vegetal produzido nestas condições tende a ser mais friável e quebradiço, o que resulta na diminuição da qualidade do mesmo como matéria-prima em processo siderúrgicos e tendência maior a gerar finos (1, 54).

Do ponto de vista ambiental, elevados teores de umidade da madeira contribuem para emissão de uma maior quantidade de gases de efeito estufa durante a carbonização (3). Como reflexo da importância do controle da umidade da madeira na sustentabilidade da produção de carvão vegetal, foi implementado pelo Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) a Deliberação Normativa (6), que objetiva estabelecer diretrizes normativas de produção de carvão vegetal como forma de reduzir as emissões atmosféricas do processo.

A secagem da madeira, neste sentido, é uma etapa fundamental na produção de carvão vegetal. A secagem natural é o principal método de secagem empregado pelas produtoras de carvão (10, 13). Desta forma, a madeira recém abatida é empilhada nas bordas dos talhões. O período de secagem comumente é de 90 a 150 dias, variando de acordo com as condições do clima, temperatura ambiente, umidade do ar e velocidade do vento da região. De forma geral, recomenda-se que a madeira fique em campo até atingir a umidade de 40%, valores estes recomendáveis para a produção de carvão vegetal (62).

Embora seja considerada uma forma de redução de umidade de baixo custo e de fácil execução, a secagem natural tem algumas desvantagens. Devido ao longo período em que a madeira é estocada em campo, é necessário que um elevado volume de madeira seja estocado em campo, o que representa capital imobilizado sem geração de receita. Outro aspecto importante a ser considerado é que, dependendo das condições do ambiente, que podem prolongar o período de secagem ou de oscilações na demanda de produção de carvão vegetal, é exigida a utilização de madeiras acima dos teores recomendados de umidade, o que impacta negativamente o processo de carbonização e qualidade do carvão.

Desta forma, a secagem artificial da madeira pode ser uma alternativa interessante a ser considerada pelas empresas produtoras de carvão vegetal. Dentre os aspectos positivos da secagem artificial, destacam-se a eficiência, controle das variáveis de secagem, menor tempo de duração e redução do tempo de estoque de madeira em campo. No entanto, estudos e/ou iniciativas de desenvolvimento de tecnologias de secagem artificial voltadas para produção de carvão vegetal, que abordando seus potenciais, limitações e perspectivas, ainda são incipientes.

2.1.4. Secagem artificial da madeira na produção de carvão vegetal

Iniciativas de secagem artificial, tanto no âmbito do pequeno/médio quanto para o grande produtor, têm sido desenvolvidas e testadas para isenção na cadeia produtiva de carvão vegetal. As principais abordagens destas tecnologias são secagens no interior do forno e em secadores externos, que embora incipientes e implantados de forma experimental e/ou piloto, são um reflexo da busca do setor pela adequação do teor de umidade da madeira, e conseqüentemente, melhoras no âmbito econômico e ambiental do processo.

A secagem da madeira no interior do forno de carbonização é uma alternativa interessante de secagem artificial, uma vez que o processo ocorrerá no próprio forno, resultando no pré-aquecimento de sua estrutura e leito de madeira, o que favorece o início do processo de conversão térmica. Além disto, pode permitir a utilização dos gases combustos da carbonização como fonte de energia térmica no sistema, o que representa um relevante passo no aproveitamento dos produtos da carbonização. No entanto alguns aspectos devem ser levados em consideração, tais como: impacto da secagem na vida útil e estrutura do forno; limite de temperatura de admissão dos gases no forno que, caso inadequado, pode resultar no início da carbonização; gasto energético dos motores utilizados para realizar a exaustão dos gases; sincronização dos fornos em atividade para fornecimento constante de gases combustos; e aumento de mais uma etapa no ciclo produtivo do forno, o que resulta no acréscimo no número de dias que o forno será utilizado para produzir uma batelada de carvão vegetal.

A utilização de secadores externos é outra estratégia avaliada para incorporação no processo de produção de carvão vegetal. Uma vez que são utilizados secadores externos, a secagem não compromete o período de duração da carbonização e possíveis danos na estrutura do forno, além de ser possível a utilização dos gases combustos da carbonização como fonte de energia térmica. Porém, requer uma maior movimentação de carga de madeira na planta de carbonização, e assim como na secagem no interior do forno, a exigência demanda energética para suprir equipamentos elétricos e de um sustentável fornecimento de gases combusto da carbonização, podem ser fatores críticos para sua viabilidade econômica.

Abaixo estão sintetizadas algumas das principais iniciativas e/ou estudos de secagem artificial em estruturas externas ao forno de alvenaria voltadas direcionadas para produção de carvão vegetal:

- I. Cardoso (11), em escala piloto, desenvolveu um sistema de secagem composto por um secador metálico acoplado a um sistema forno-fornalha, assim a energia térmica utilizada para secagem foi proveniente dos gases combustos da carbonização. Toras de 2 m de comprimento de *Eucalyptus* sp., separadas em três classes diamétricas, foram submetidas a um tempo de secagem de 68 h, em uma temperatura média de admissão dos gases de 150 °C, em um secador de capacidade volumétrica útil de 16,8 m³. Como resultado, obteve uma redução de umidade de 42,58 %, 27,43 % e 42,58 %, em toras de diâmetro de 8 a 14 cm, 14 a 22 cm e 8 a 22 cm, respectivamente.
- II. Em escala laboratorial, Oliveira *et al.* (9), realizou secagens em uma estufa de circulação forçada de ar em toretes de 60 cm de comprimento de *Eucalyptus* sp., separadas nas classes diamétricas de 8 a 12 cm, 12 a 16 cm e 16 a 20 cm, nas temperaturas de 50, 70, 100, 125 e 150° C, além de avaliar a presença e ausência de cascas nestas condições. O autor, obteve como principal resultado que o aumento da temperatura promoveu um aumento na taxa de secagem, em que toras de menor diâmetro, este efeito foi mais pronunciado. Em relação a casca, não foi observado efeito significativo na secagem.
- III. Em escala piloto, um secador metálico foi avaliado por Figueiro *et al.* (14) para utilização em toras de 3 m de comprimento, separadas nas classes de diâmetro de 12,5 cm e 16,5 cm. A energia térmica para utilização do secador foi proveniente de um sistema de combustão de biomassa. Com um tempo de secagem de 72 h e temperatura de admissão de 100 a 150 °C, foi observado uma perda média de 8% de umidade, em que não foi observado o efeito do diâmetro.

De forma geral, observa-se que nestes sistemas citados a temperatura máxima de admissão de gases para o interior do secador foi de 150 °C, devido, principalmente, a limitação técnica do equipamento e/ou inseguranças em relação a ocorrência de possíveis focos de fogo. Em todos os sistemas, ocorreu uma separação

diamétrica, o que enfatiza as preocupações com os efeitos do diâmetro na secagem da madeira. Em relação ao tamanho da peça de madeira, foram utilizadas, peças de comprimentos de 2 a 3 m, o que corresponde ao tamanho utilizado na carbonização.

Embora tais informações de secagem artificial da madeira sejam de extrema relevância para o setor de carvão vegetal, e contribuem para o conhecimento atual sobre este tema, é necessário o desenvolvimento e divulgação de novos estudos ou iniciativas elucidem de forma mais abrangente sobre potencial e limitações dos sistemas de secagem artificial. Assim, além de suprir a carência de informação sobre determinados pontos ainda pouco explorados, é importante que tais estudos também acompanhem a evolução das tecnologias de carbonização, como retortas contínuas de produção de carvão vegetal.

2.2. Potencial de utilização da secagem artificial em sistemas contínuos de carbonização

A carbonização da madeira, em retortas contínuas, embora seja umas das mais promissoras tecnologias de produção de carvão vegetal no cenário brasileiro, também é impactada pela utilização de madeiras com inadequados teores de umidade. Assim, a implementação de sistemas de secagens acoplados a esta tecnologia pode significar uma adequação e homogeneização do teor de umidade da madeira de maneira rápida e eficiente, o que propicia um controle maior do processo de carbonização. Além disto, acredita-se que a secagem da madeira pode ser facilitada devido ao tamanho da peça utilizada nestes sistemas. Em sistemas que utilização fornos de alvenaria, o comprimento da peça utilizada é, em média, de 3 m, já na produção contínua, o comprimento é de aproximadamente 40 cm, permitindo a flexibilidade de utilização de menores comprimentos ou outros layouts de corte.

A movimentação de fluídos nas árvores ocorre, principalmente, no sentido longitudinal, sendo que a permeabilidade da madeira pode ser até 1000 vezes maior neste longitudinal, quando comparado ao sentido transversal (63). Por conta disso, quanto menor o comprimento das peças, mais fácil será o transporte da água durante a secagem, uma vez que menor será seu comprimento longitudinal garantindo uma maior facilidade de secagem. Além disso, existem diversas possibilidades que podem acelerar ainda mais a secagem desse toretes para os sistemas contínuos de carbonização, como o corte das porções mais grossas da árvore com 20 cm de

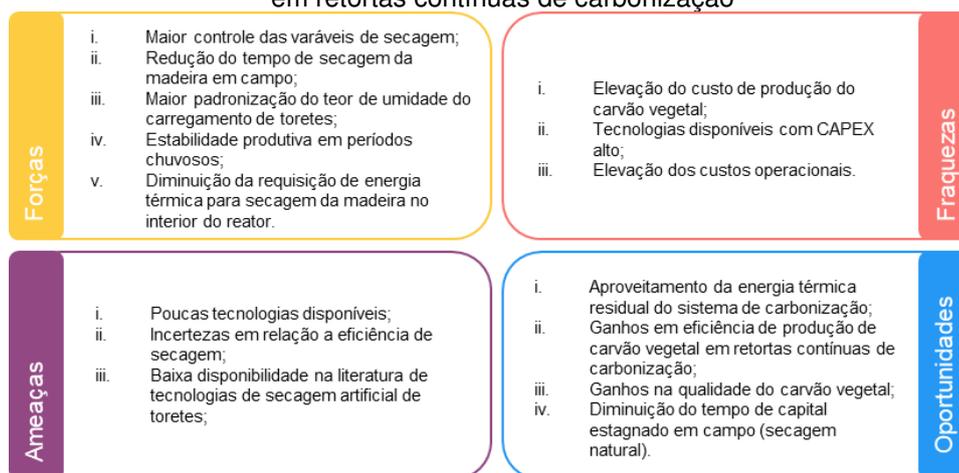
comprimento, ou até mesmo rachar os toretes ao meio garantindo uma área superficial ainda maior.

Outro aspecto relevante a ser considerado, é que os sistemas de secagem artificiais podem utilizar a energia térmica residual da retorta contínua. Portanto, o principal fator limitante para o emprego de sistemas artificiais de secagem não está relacionado à disponibilidade de energia para a secagem, mas sim na disponibilidade de tecnologias de secagem para grandes peças de madeira, que apresentam baixo custo e alta eficiência.

Desta forma, é fundamental a realização de estudos que elucidem os potenciais e as limitações da secagem da madeira, no cenário da produção contínua de carvão vegetal, subsidiando informações sobre tipo e layout de secadores, que resultem na máxima eficiência de perda de umidade, em um tempo economicamente viável e sem perdas significativas na qualidade do carvão vegetal, são ainda indisponíveis.

Baseado no conhecimento científico, apresentado ao longo da revisão bibliográfica, em conjunto com percepções práticas e industriais, foi desenvolvido uma análise SWOT. Identificou-se 15 fatores que impactam direta e indiretamente os aspectos econômicos e tecnológicos da secagem artificial da secagem da madeira.

Figura 2 - Matriz SWOT secagem natural x secagem artificial de toretes de madeira para utilização em retortas contínuas de carbonização



Desta forma, embora seja o método de baixo custo e relativamente fácil de ser implantado, a secagem natural da madeira tem diversas desvantagens, tais como baixa eficiência, longo período de duração, ausência total ou parcial do controle das

condições do ambiente (temperatura, velocidade, umidade relativa e circulação do ar), dentre outros.

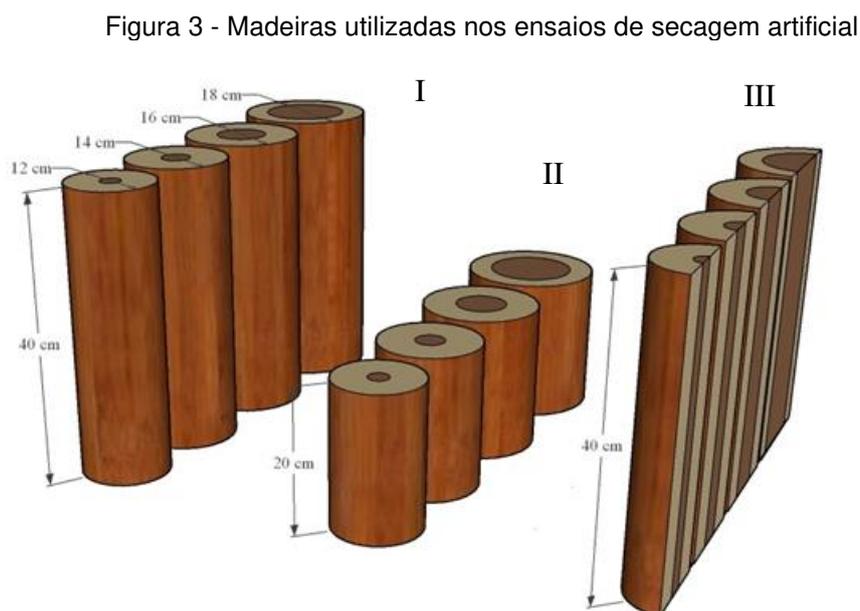
Tecnologias de secagem artificial da madeira direcionadas para utilização em sistemas de produção de carvão vegetal ainda estão em escala piloto ou laboratorial. Indefinições sobre as condições limitantes e otimizadas de secagem, em função de parâmetros como temperatura, vazão, tempo de residência, layout de corte e diâmetro da madeira, ainda não estão completamente elucidadas. Portanto, acredita-se que a carência de estudos que forneçam informações sobre o dimensionamento e viabilidade de projetos de secagem artificial, pode ser considerado uma ameaça para incorporação desta tecnologia.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas seis árvores de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, provenientes de plantios comerciais com idade de 7 anos e cultivados em espaçamento 3 x 2 cm, pertencentes a empresa Vallourec, localizados no município de Paraopeba - MG. O município apresenta altitude variando de 734 a 761 m e clima do tipo Aw, de acordo com a classificação de Köppen. A precipitação anual média é de 1236 mm e o deficit hídrico de 93 mm, com temperatura média anual de 21,6°C (64, 65).

As árvores foram seccionadas em toretes de 40 cm e transportadas para o Laboratório de Painéis e Energia da Madeira - LAPEM da Universidade Federal de Viçosa - UFV, onde foram separadas em quatro classes de diâmetro, a saber: <12 cm, 12,1 – 14, 14,1 – 16 cm e 16,1 – 18 cm.

Para os estudos de secagem artificial da madeira, em alta temperaturas, utilizou-se amostras de madeira, com casca, preparadas conforme os tratamentos, a saber: I) Torettes de madeira com comprimento médio de 40 cm; II) Torettes de madeira com comprimento médio de 20 cm; III) Torettes seccionados ao meio, ou seja, rachados (Figura 3). Esses tratamentos foram aplicados a todas as classes de diâmetro a serem avaliados, utilizando, quatro unidades amostrais por tratamento.



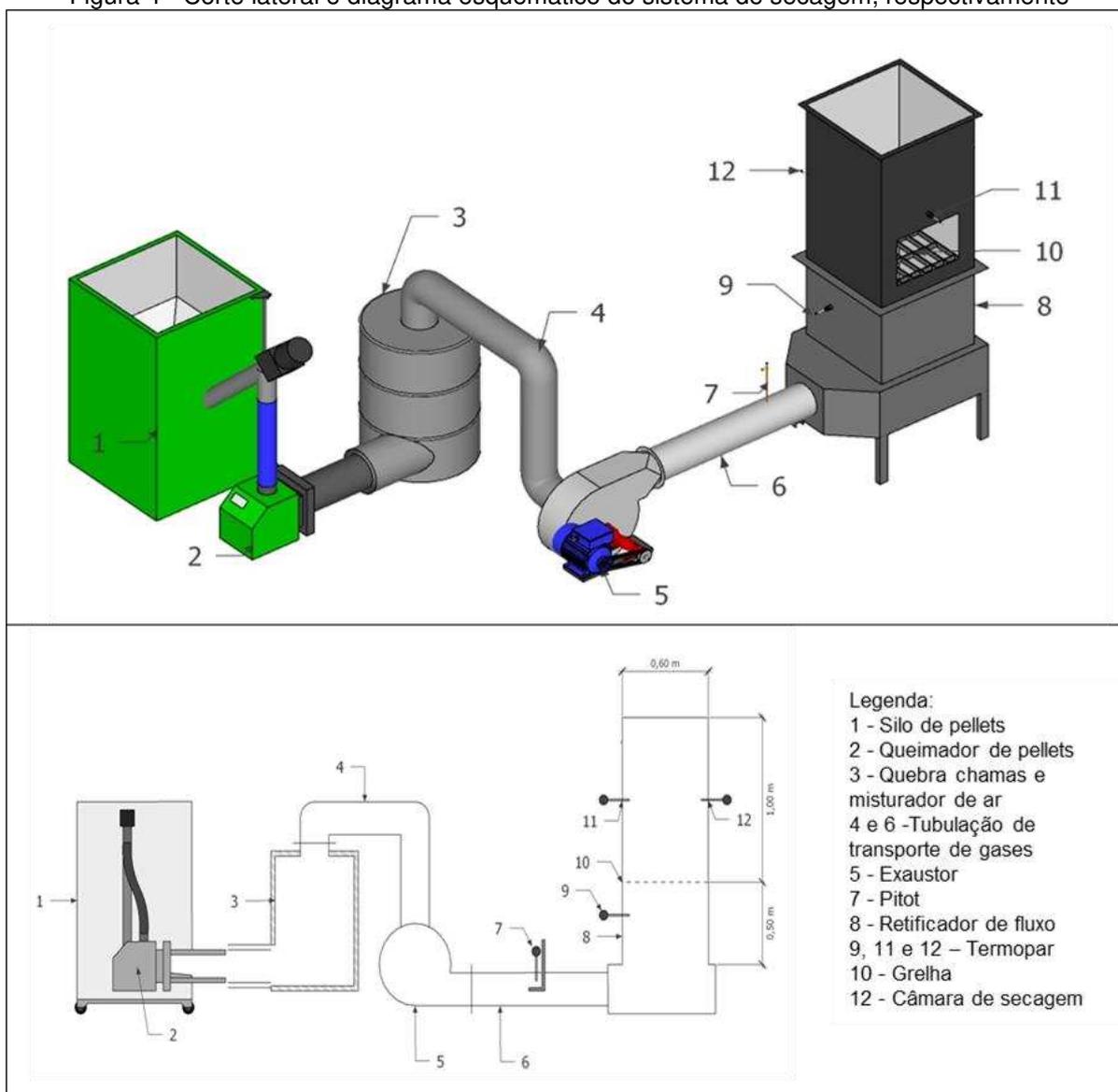
Legenda: I = Torettes de madeira de comprimento de 40 cm; II = Torettes de madeira de comprimento de 20 cm; e III = Seccionada ao meio (rachada).

3.1. Desenvolvimento e construção do sistema de secagem artificial da madeira

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

Na Figura 4 é apresentado o sistema de secagem artificial da madeira e seus principais componentes.

Figura 4 - Corte lateral e diagrama esquemático do sistema de secagem, respectivamente



A energia térmica, ou seja, o gás quente necessário para a realização da secagem das madeiras foi gerado a partir e de um queimador horizontal de pellets Modelo QPJet (Lipel) (Item - 2). O queimador é composto por um reservatório externo

de pellets (Item 1), com capacidade de 200 kg, acoplado a uma rosca sem fim para a alimentação do queimador; um ventilador para fornecimento de ar para combustão; uma câmara de combustão, com ignição por resistência elétrica; e dois termopares tipo K, sendo um localizado no interior da câmara de combustão e o outro na entrada do secador de madeira, os quais são utilizados para controle, automático, da temperatura dos gases na saída do queimador, por meio da dosagem da quantidade de pellets admitos na câmara de combustão.

Para evitar o contato direto da chama com o exaustor e para auxiliar no controle da temperatura dos gases na saída do queimador de pellets instalou-se um misturador de ar (Item 3), construído em aço carbono, o qual funcionou também como quebra-chamas. O misturador de ar foi revestido internamente com uma camada de fibra cerâmica, de 5 mm de espessura, para isolamento térmico e proteção da estrutura.

O transporte dos gases do misturador de ar até a câmara de secagem do secador de toretes foi realizado por meio de tubulações (Itens 4 e 6), em aço carbono, com diâmetro interno de 19 cm, revestidas externamente com uma camada de fibra cerâmica, de 5 mm de espessura, visando seu isolamento térmico.

Os gases provenientes do misturador de gases foram succionados por um exaustor centrífugo de rotor aberto, com pás para trás, acoplado a um motor de 0,5 cv (Item 5) e conduzidos até uma tubulação (19 cm de diâmetro e 1 m de comprimento), que realizou o transporte dos mesmos até a câmara de secagem. Na tubulação, foi instalado um tubo pitot para determinação da vazão de gases injetado na câmara de secagem.

A câmara de secagem do secador foi construída em formato retangular, com chapa de aço carbono, nas dimensões de 1,5 m de altura e 0,6 m de largura, dividida em dois compartimentos. O primeiro compartimento, localizado na parte inferior da câmara de secagem, com dimensões de 0,5 m de altura e 0,6 m de largura, teve como função, principal, retificar o fluxo de gases, objetivando a minimização de possíveis fluxos preferenciais (Item 8). Em sua estrutura foi inserido um termopar tipo K (Item 9) para monitoramento e controle da temperatura de secagem e consequentemente controle da temperatura de saída dos gases do queimador de pellets.

O segundo compartimento, localizado na parte superior, da câmara de secagem (Item 12) foi construído com dimensões nominais de 1 m de altura e 0,6 m

de largura. Na sua região inferior foi inserida uma grelha (Item 10) para apoio das amostras de madeira. Já na região frontal deste compartimento, a 15 cm da grelha, foi inserida uma abertura de 0,4 m de altura e 0,4 m de largura para carregamento e descarregamento da carga de madeira no secador. E na região superior do mesmo, a 0,9 m da base, foram colocados dois termopares do tipo K (Itens 11 e 12), de forma paralela, para monitoramento da temperatura de saída do gás.

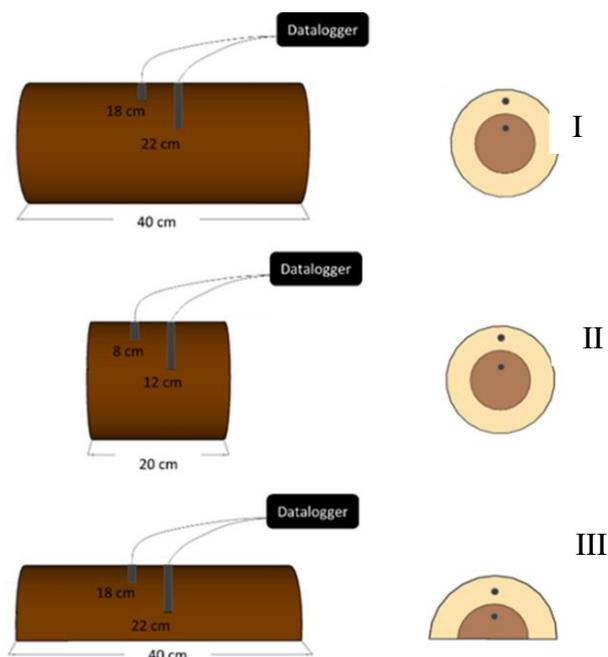
3.2. Secagem artificial da madeira

Inicialmente, antes da secagem da madeira, toretes de madeira, com casca, correspondentes a cada classe de diâmetro, foram selecionados para determinação do teor de umidade inicial, base seca, para realização da secagem.

Para determinação do teor de umidade inicial, de cada torete amostra, foram retirados dois discos na extremidade e um no centro do torete de madeira, que posteriormente foram levados à estufa de secagem à temperatura de 103 ± 2 °C, até massa constante.

Os toretes separados para a secagem, por sua vez, foram pesados para obtenção da massa inicial e em seguida inseriu-se dois termopares, conforme Figura 5, para monitoramento e obtenção dos perfis de temperatura durante a secagem. Para abertura dos orifícios para inserção dos termopares utilizou-se uma furadeira com broca de 3 mm. Foram utilizados termopares do tipo J, de diâmetro de dois milímetros e haste de ferro e constantan, revestido de fibra em malha traçada.

Figura 5: Localização dos termopares inseridos na madeira

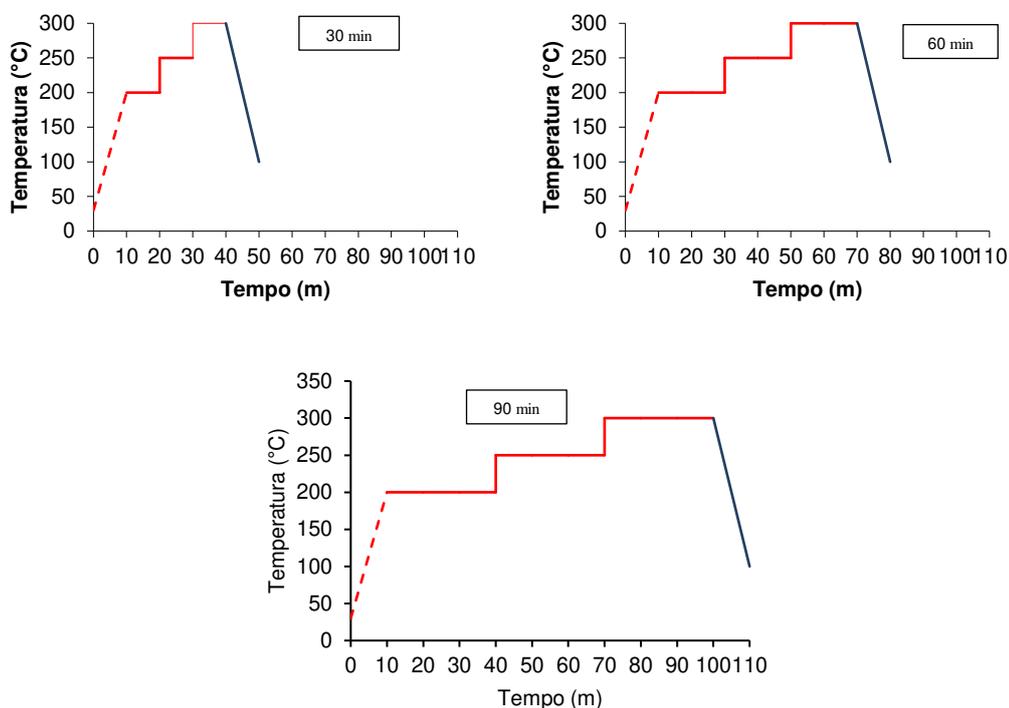


Legenda: I = Madeira com comprimento de 40 cm; II = Madeira com comprimento de 20 cm; e III = Madeira seccionada ao meio (rachada).

Depois de inseridos os termopares, procedeu o carregamento dos toretes de madeira para dentro da câmara de secagem do secador, posicionada no sentido horizontal, formando duas camadas, sendo, a primeira camada composta por toretes de madeiras, de cada classe diamétrica avaliada e a segunda camada composta por toretes de diâmetro médio. Ressalta-se que as amostras utilizadas para o preenchimento da câmara de secagem foram previamente pesadas para obtenção da sua massa total inicial.

Após do carregamento da madeira, realizou o fechamento da porta da câmara de secagem e iniciou-se o processo de secagem, por meio da ignição no queimador de pellets e acionamento do ventilador. A secagem da madeira foi realizada em três estágios (Figura 6).

Figura 6 - Temperaturas pré-estabelecidas de entrada no secador de acordo com os estágios do ciclo de secagem artificial da madeira.



O primeiro estágio consistiu no aquecimento da câmara de secagem até a temperatura de 200°C, medido na entrada da mesma, permanecendo nesta por dez minutos, independente do tratamento.

No segundo estágio, aumentou-se a temperatura da câmara de secagem até 300°C, sendo a taxa de secagem variável de acordo com o tempo de residência avaliado. Para as secagens realizadas com os tempos de residência de 30 e 60 minutos, foi efetuado um acréscimo na temperatura de 50°C a cada 20 min. Para as secagens realizadas com tempo de 90 min, houve um acréscimo de temperatura de 50°C a cada 30 minutos.

O procedimento de incremento gradativo da temperatura foi realizado, devido a dinâmica em que a secagem ocorre na madeira. A secagem da madeira ocorre em função de um gradiente de umidade, do interior para a superfície do torete, assim, se a temperatura for constante, a taxa de evaporação poderá decrescer de acordo com a diminuição da umidade. Logo, para manter a taxa de secagem próxima de constante, é necessário aumento de fornecimento de energia ao decorrer da secagem, o que justifica a utilização de um acréscimo gradual de temperatura.

Por fim, o terceiro estágio foi o resfriamento, onde, para todos os tratamentos, ao final do tempo de secagem, o queimador que fornece os gases quentes para o sistema foi desligado e as amostras de madeira permaneceram por mais 10 minutos, dentro da câmara de secagem para reduzir a sua temperatura até aproximadamente 100 °C.

Após esse período, as madeiras foram descarregadas do secador e pesadas. Foram pesadas amostras individuais e também toda a carga de madeira, de modo, a obter a massa final para determinação da massa de água eliminada durante a secagem. Posteriormente a pesagem dos toretes, uma amostra de cada diâmetro de torete, dos tratamentos realizados, foram direcionadas ao preparo para obtenção do perfil de umidade.

3.3. Perfil de umidade

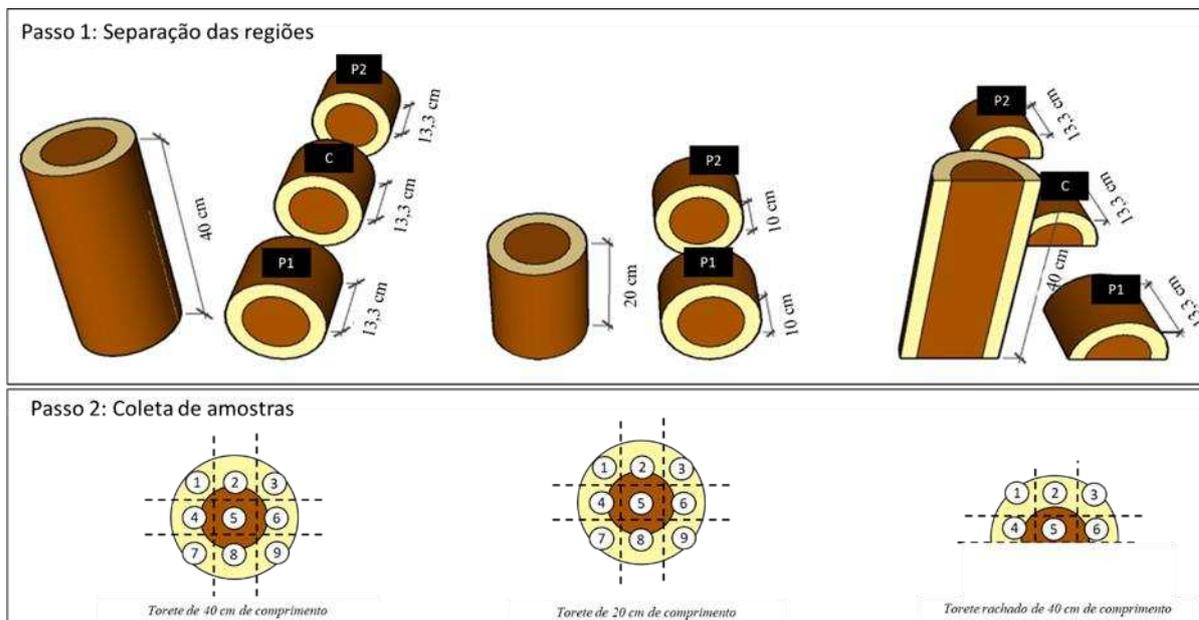
Para confecção do perfil de umidade dos toretes de madeira, após sua secagem, foram realizadas duas séries de seccionamentos (Passo 1 e Passo 2) nas amostras coletadas, que variaram de acordo com o layout de corte e comprimento dos toretes (Figura 7).

Nos toretes de 40 cm de comprimento, as amostras primeiramente foram seccionadas em três regiões, denominadas P1, C e P2, com 13,3 cm de comprimento cada (Figura 7 – Passo 1). Posteriormente, cada região foi novamente seccionada em nove partes (Figura 7 – Passo 2).

Nos toretes de 20 cm, devido ao seu comprimento ser a metade do torete de 40 cm, o mesmo foi seccionado em apenas duas regiões, denominadas P1 e P2, com 10 cm de comprimento cada (Figura 7 – Passo 1). Depois, cada região foi subdividida em nove partes (Figura 7 – Passo 2).

Já nos toretes rachados, as amostras foram divididas em três regiões, denominadas de P1, C e P2, com comprimento médio de 13,3 cm cada (Figura 7 – Passo 1). Depois essas foram novamente seccionadas em seis partes (Figura 7 – Passo 2).

Figura 7 - Esquema de seccionamento das amostras de toretes após a secagem, em função do layout de corte.



As amostras de madeiras coletadas foram levadas à estufa de secagem à temperatura de 103 ± 2 °C, até massa constante.

3.4. Monitoramento de temperatura e vazão

O monitoramento e coleta de informações referentes as temperaturas do sistema de transporte de gás, do secador e do interior dos toretes, durante as secagens, assim como a aferição da vazão volumétrica, foi realizado a cada dez minutos de secagem.

Os valores de vazão volumétrica foram obtidos por meio da conversão da pressão diferencial, fornecida por um manômetro de coluna em U. Para isto, utilizou-se as fórmulas I, II e III.

$$Q = V.A.3600 \quad (I)$$

Onde:

Q = vazão volumétrica do gás, em m³/h;

V = velocidade do fluido, em m/s;

A = área da seção transversal da tubulação, em m².

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_r}} \quad (\text{II})$$

Onde:

V = velocidade do fluido, em m/s;

Δp = diferença de pressão obtida pelo manômetro (pressão dinâmica), em Pascal (Pa);

ρ_r = densidade do fluido, em kg/m³.

$$Q_N = Q \frac{273,15}{273,15 + T} \quad (\text{III})$$

Onde:

Q_N = vazão volumétrica em condições normais (0 °C e 1 atm), em Nm³/h;

Q = vazão volumétrica do fluido, em m³/h;

T = temperatura do fluido, em K.

3.5. Taxa de secagem

As taxas médias de secagem para cada tratamento foram obtidas de acordo com a fórmula IV.

$$T_s = \frac{(Tu_i - Tu_f)}{t} \quad (\text{IV})$$

Onde,

T_s: taxa de secagem (%/min);

T_{u_i}: teor de umidade inicial (%);

T_{u_f}: teor de umidade final (%);

T: tempo (min)

3.5. Eficiência energética da secagem

Para determinação da eficiência energética da secagem, primeiramente, calculou-se a quantidade de energia térmica, fornecida para cada faixa de temperatura do programa de secagem, para os tratamentos realizados. Assim, o calor sensível fornecido para cada secagem foi calculado por meio da fórmula V.

$$q_{sec} = (V \cdot \rho \cdot cp \cdot \Delta t \cdot T)_1 + (V \cdot \rho \cdot cp \cdot \Delta t \cdot T)_2 + (V \cdot \rho \cdot cp \cdot \Delta t \cdot T)_3 + (V \cdot \rho \cdot cp \cdot \Delta t \cdot T)_4 + (V \cdot \rho \cdot cp \cdot \Delta t \cdot T)_5 \quad (IV)$$

Onde,

q_{sec} = calor sensível fornecido para secagem (kcal);

V = vazão dos gases na entrada do secador (m/s);

ρ = densidade do gás (g/m³);

cp = calor específico do gás (Kcal/(kg*K));

Δt = temperatura (k);

T = tempo (s);

1, 2, 3, 4 e 5 = estágio de aquecimento, primeira temperatura pré-estabelecida de secagem (200°C), segunda temperatura pré-estabelecida de secagem (250°C), terceira temperatura pré-estabelecida de secagem (300°C) e estágio de resfriamento, respectivamente.

A vazão dos gases na entrada do secador foi medida por meio de um tubo de Pitot para cada estágio de secagem. O calor específico do gás, assim como a sua densidade foram obtidos na literatura, conforme a temperatura média de cada estágio de secagem.

Posteriormente, foi calculado a quantidade de energia necessária para retirada de água livre na madeira. Para isto, para cada classe de diâmetro, o valor de massa de água eliminada foi multiplicado por 569 kcal/kg, que segundo Skaar (66), representa a quantidade de energia necessária para retirada de 1 kg de água livre na madeira.

Por fim, foi estimada a quantidade de energia térmica utilizada para o aquecimento dos toretes, durante os estágios do programa de secagem, de acordo com a equação VI.

$$q_{mad} = (m \cdot cp \cdot \Delta t)_1 + (m \cdot cp \cdot \Delta t)_2 + (m \cdot cp \cdot \Delta t)_3 + (m \cdot cp \cdot \Delta t)_4 + (m \cdot cp \cdot \Delta t)_5 \quad (VI)$$

Onde,

q_{mad} = quantidade de calor fornecido para aquecimento da madeira (kcal);

m = massa seca de madeira (kg);

cp = calor específico da madeira (Kcal/(kg.C));

Δt = temperatura (°C);

1, 2, 3, 4 e 5 = estágio de aquecimento, primeira temperatura pré-estabelecida de secagem (200°C), segunda temperatura pré-estabelecida de secagem (250°C), terceira temperatura pré-estabelecida de secagem (300°C) e estágio de resfriamento, respectivamente.

O calor específico da madeira foi estimado de acordo com Kollman e Cote (67), conforme as equações VII e VIII.

$$c_{p_{mad. seca}} = 0,2692 + 0,00108.t \quad (VII)$$

$$cp = \frac{U + c_{p_{mad.seca}} + A}{1 + U} \quad (VIII)$$

Onde,

$c_{p_{mad. seca}}$ = calor específico da madeira seca (kcal/kg.°C);

t = temperatura da madeira (°C);

cp = calor específico da madeira (Kcal/(kg.C));

U = teor de umidade da madeira (%/100);

A = calor específico adicional, devido a energia de ligação madeira-água.

A eficiência de secagem foi obtida por meio da divisão do calor sensível fornecido para a secagem pela soma da quantidade de energia utilizada para a remoção de água livre da madeira e quantidade de calor fornecido para aquecimento da madeira (Equação IX).

$$Eficiência\ de\ secagem\ (\%) = \frac{q_{vap} + q_{mad}}{q_{sec}} \quad (IX)$$

Onde,

q_{sec} = calor sensível fornecido para secagem (kcal);

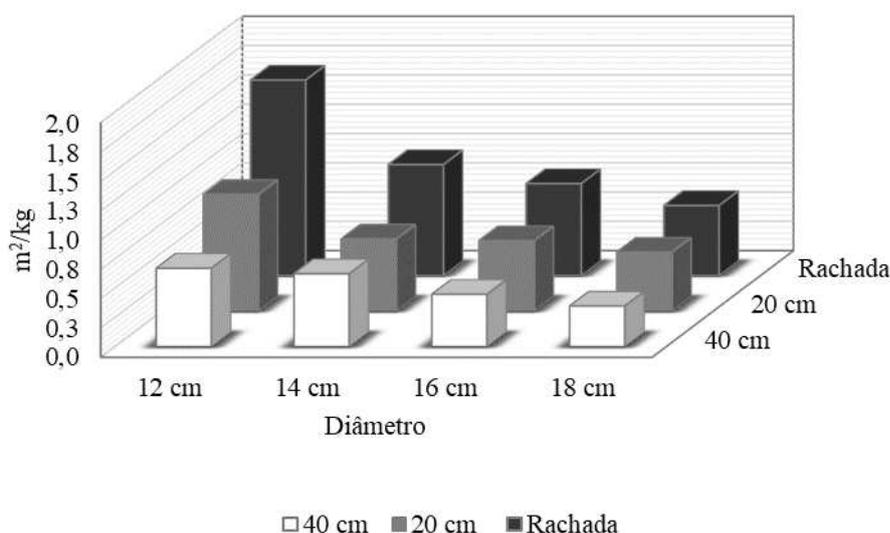
q_{mad} = quantidade de calor fornecido para aquecimento da madeira (kcal);

q_{vap} = quantidade de calor fornecido para vaporização da água (kcal).

3.6. Área de madeira disponível para contato com o gás combusto

A área de madeira disponível para contato com o gás combusto e sua fórmula de cálculo, de acordo com o diâmetro e layout de corte, estão apresentadas na Figura 8 e Equação X, respectivamente.

Figura 8 - Área de madeira disponível para contato com o gás combusto, em função do diâmetro do torete, para os layouts de corte avaliados.



$$A_{sec} = \frac{A_t}{m} \quad (X)$$

Onde,

A_{sec} = área de madeira disponível para contato com o gás (m²/kg);

A_t = área do tolete (m²);

m = massa seca do tolete (kg).

3.7. Análise de dados

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial triplo (3 x 4 x 3), para avaliação do efeito do layout de corte da madeira (40 cm de comprimento, 20 cm de comprimento e seccionada ao meio), classe de diâmetro (<12 cm, 12,1 – 14, 14,1 – 16 cm e 16,1 – 18 cm) e tempo de residência da madeira na câmara de secagem (30, 60, 90 min). Foram realizadas quatro repetições, totalizando 36 tratamentos e 144 unidades amostrais.

Para explicar o efeito das variáveis na perda total de umidade, taxa de secagem e perfil de temperatura na madeira, foram ajustados modelos de regressão. Os critérios utilizados para seleção do melhor modelo ajustado foi significância dos parâmetros, erro padrão residual, distribuição de resíduos e coeficiente de determinação ajustado. Com base no ajuste realizado, foram confeccionados gráficos de superfície resposta e contornos.

O perfil de umidade foi construído dos toletes, após as secagens, foi construído por meio do processo de interpolação Inverso do Quadrado da Distância (IDW). A função de interpolação IDW calcula os pontos desconhecidos a partir da média ponderada dos pontos amostrados. A distância entre o ponto estimado e os pontos amostrados é utilizada como fator de ponderação dando o maior valor aos pontos mais próximos do ponto estimado (Dixon & Uddameri, 2016). A equação geral do IDW é dada por (XI):

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^s Z_i \left(\frac{1}{d_i^2}\right)}{\sum_{i=1}^s \left(\frac{1}{d_i^2}\right)} \quad (XI)$$

onde:

Z₀ = Valor estimado da propriedade no ponto 0;

Z_i = Valor da propriedade no ponto conhecido;

d_i = distância entre o ponto i e o ponto 0;

s = número de pontos conhecidos usados na estimativa.

Os dados de eficiência energética, de acordo com o tempo de residência, para os diferentes layouts, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de Tukey a 5% de significância.

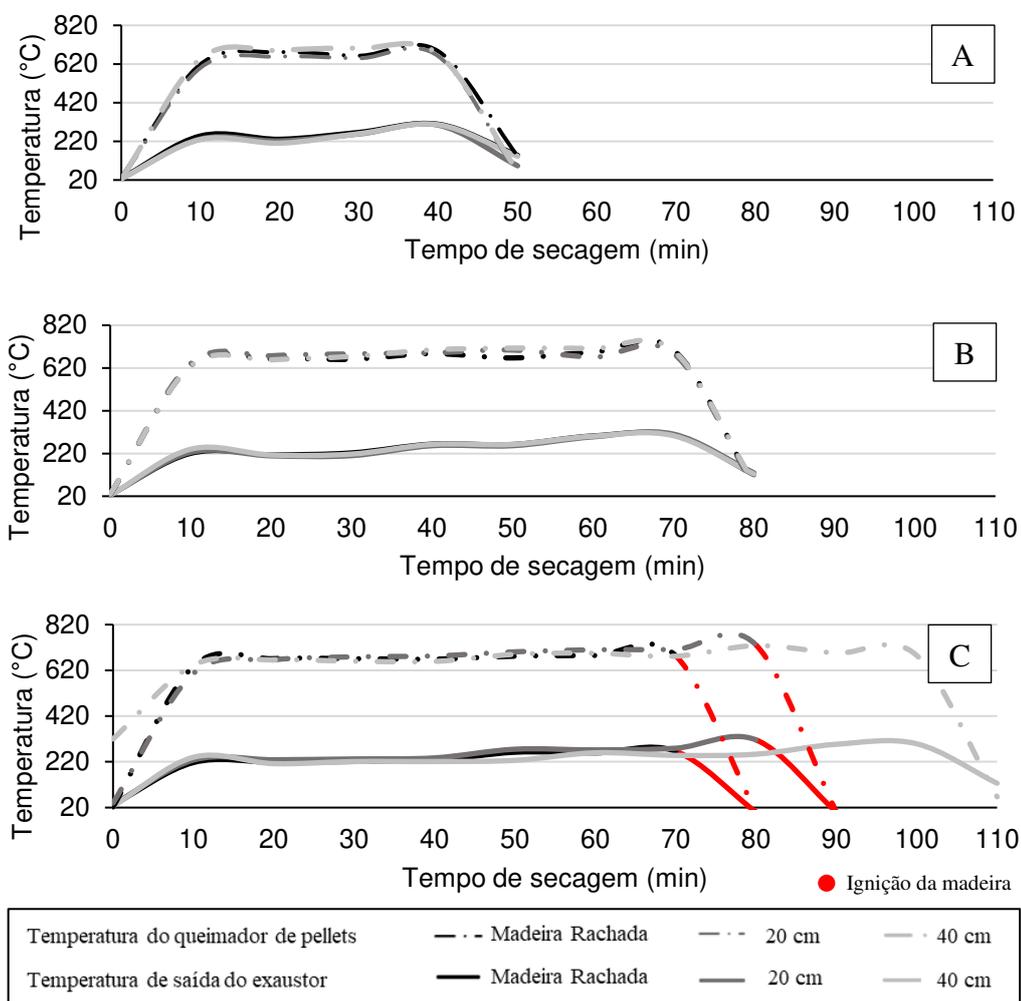
O software de análise estatística R (R CORE TEAM, 2018) foi utilizado para a execução das análises estatísticas. Para a aplicação dessa interpolação utilizou-se o Package 'gstat' (Pebesma, 2004).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Perfil térmico do sistema de secagem

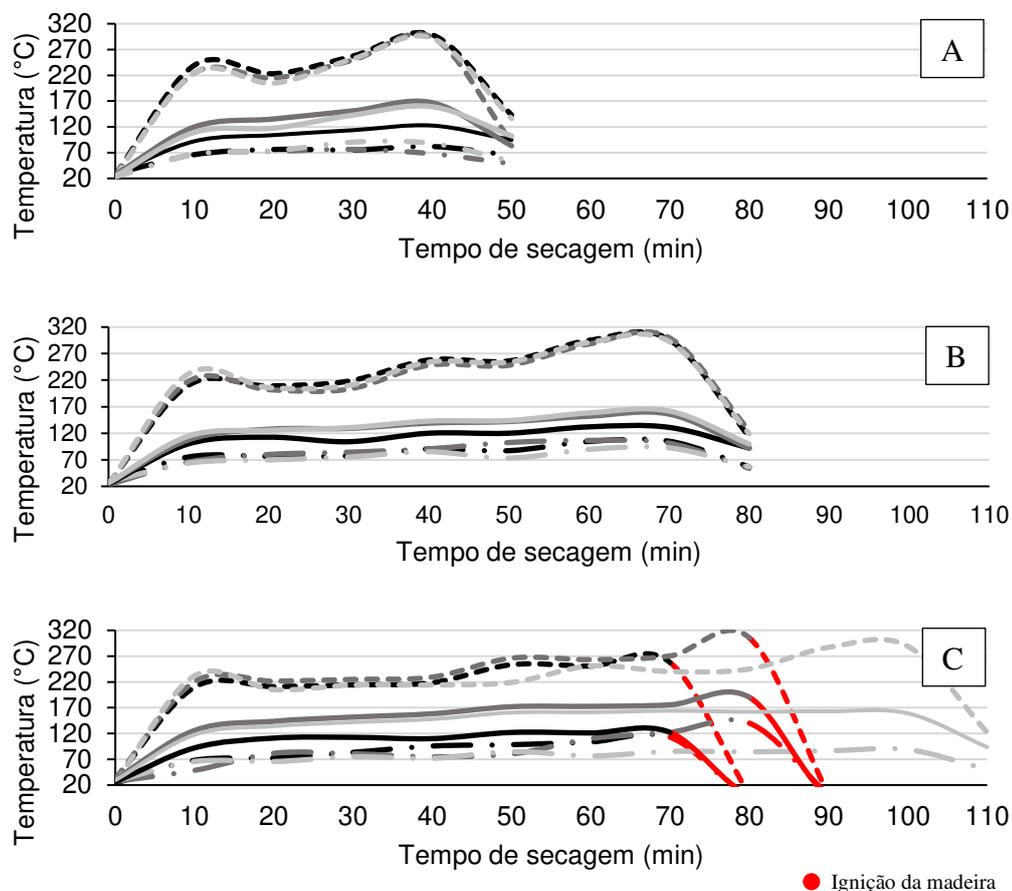
Os valores das temperaturas do sistema de fornecimento de gases para o secador, assim como as temperaturas referentes a entrada, saída e paredes do secador, de acordo com o layout de corte, em função do tempo de residência, estão apresentados na Figura 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 - Valores médios das temperaturas do sistema de fornecimento de gases para o secador



Legenda: A – Tempo de residência de 30 min; tempo de residência de 60 min; e tempo de residência de 90 min.

Figura 10 - Valores médios das temperaturas do gás de entrada, parede e saída da câmara de secagem do secador



Temperatura de entrada do secador	----	Madeira Rachada	----	20 cm	----	40 cm
Temperatura da parede do secador	- - -	Madeira Rachada	- - -	20 cm	- - -	40 cm
Temperatura de saída do secador	— — —	Madeira Rachada	— — —	20 cm	— — —	40 cm

Legenda: A – Tempo de residência de 30 min; tempo de residência de 60 min; e tempo de residência de 90 min.

Para a manutenção da temperatura de entrada no secador, estabelecida de acordo com o programa de secagem (Figura 4), foi necessário que o queimador de pellets apresentasse temperaturas superiores a 650°C na sua câmara de combustão (Figura 7). Para todos os tratamentos, independente do tempo de secagem e do layout de corte, foram necessárias temperaturas de $650 \pm 10^\circ\text{C}$, $690 \pm 10^\circ\text{C}$ e $710 \pm 10^\circ\text{C}$ na câmara de combustão do queimador de pellets, para temperaturas de entrada no secador acima de 200°C.

Para um incremento de temperatura de entrada no secador de 200 para 250°C, foi necessário um aumento de aproximadamente 40°C na temperatura da câmara de combustão do queimador de pellets. No entanto, para o acréscimo de temperatura do secador de 250 para 300°C, foi necessário um incremento de apenas 20°C na câmara de combustão do queimador de pellets. O aumento na demanda de

temperatura de entrada do secador, resulta em uma elevação na frequência de alimentação de pellets pelo queimador e, por consequência, a necessidade de ar para a combustão desse material. Assim, ocorre um aumento na vazão de gases combustos provenientes do queimador de pellets, e como a diluição do gás combusto no sistema foi mantida constante, um menor acréscimo de temperatura na câmara de combustão de pellets foi requerida para propiciar um aumento na temperatura de entrada do secador.

A temperatura de saída do exaustor, após a diluição do gás combusto com o ar atmosférico, está diretamente relacionada à temperatura de entrada do secador (Figura 7 e 8). Observa-se que as perdas térmicas entre a temperatura de saída do exaustor e entrada no secador foi de aproximadamente 10°C. Como tubulação de abastecimento de gás combusto foi isolada com manta de fibra cerâmica, para evitar perdas térmicas, espera-se a diferença entre as temperaturas de saída do exaustor e entrada no secador seja minimizada.

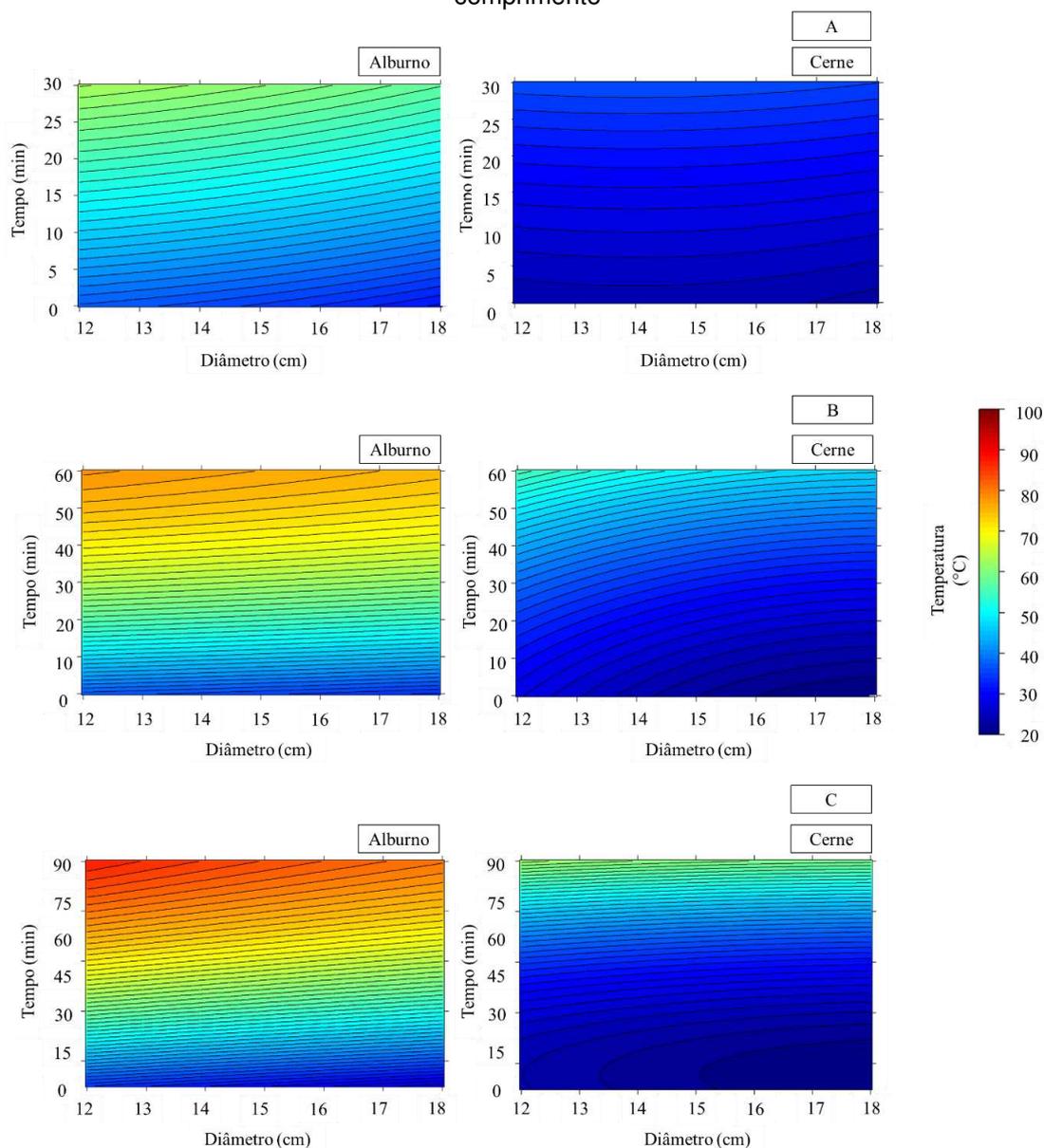
De forma geral, observa-se que as temperaturas do gás, na câmara de secagem do secador, para os diferentes layouts de corte da madeira e tempos de residência, seguiram conforme o programa de secagem pré-estabelecido (Figura 4), evidenciando o controle do processo.

As secagens realizadas com a madeira rachada tiveram as menores temperaturas de saída do secador (Figura 8), em comparação a madeira de 40 e 20 cm de comprimento, o que indica um maior aproveitamento da energia térmica do gás disponível para a secagem neste layout de corte, uma vez que a transferência de calor neste formato de torete é potencializada.

4.1. Perfil térmico da madeira nas regiões de cerne e alburno

Os perfis de temperatura do alburno e cerne dos toretes, para os diferentes layouts de corte, em função do diâmetro e tempo de residência de secagem, estão apresentados nas Figuras 11, 12 e 13. As estimativas dos parâmetros e medidas de precisão das equações associadas aos modelos utilizadas para representação dos perfis térmicos estão apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 11 - Perfis de temperatura da madeira de alburno e cerne dos toretes de 40 cm de comprimento



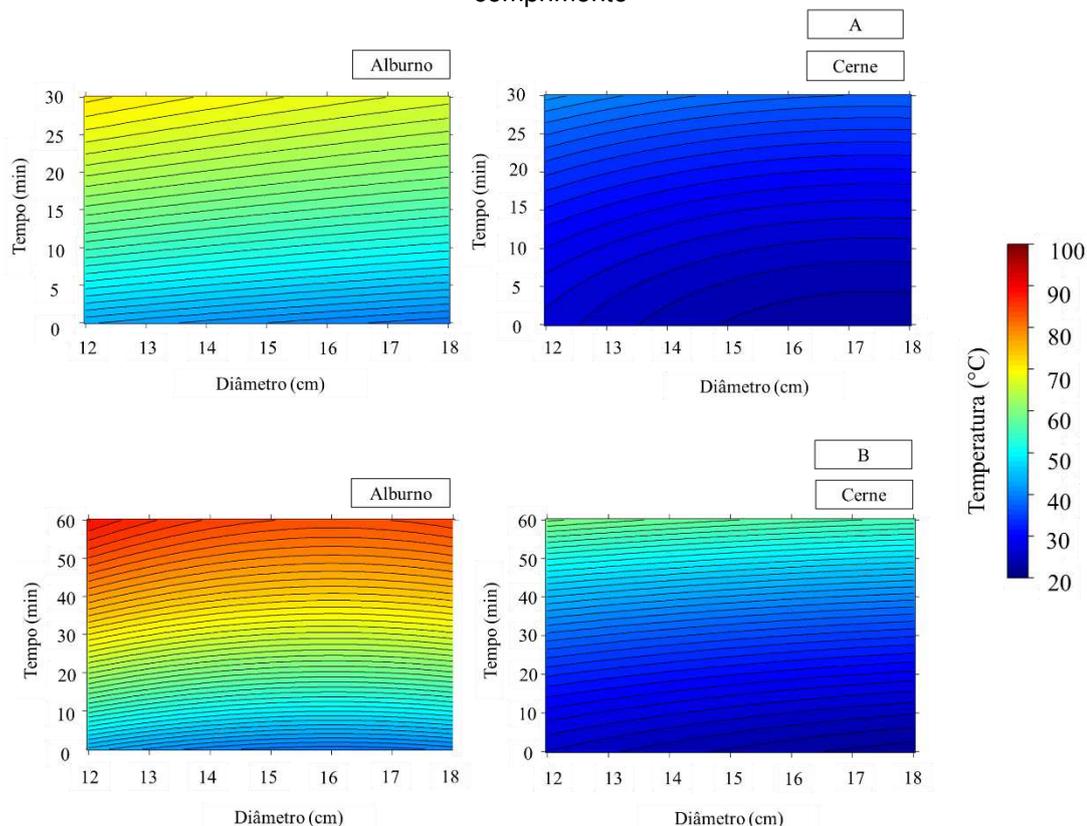
Legenda: A – tempo de residência de 30 minutos; B – tempo de residência de 60 minutos; e C – tempo de residência de 90 minutos.

Tabela 1 – Estatística associada a equação ajustada

Tempo de residência	Posição radial na madeira	Temperatura (°C) = $\beta_1 + \beta_2 \cdot D + \beta_3 \cdot T + \beta_4(D^2) + \beta_5(T^2)$					R ²	S _{y.x}
		β_1	β_2	β_3	β_4	β_5		
30 min	Alburno	25.15*	0.91*	1.04**	-0.06(ns)	-0.01(ns)	99.48	0.86
	Cerne	8.68(ns)	1.88(ns)	0.16*	-0.07*	0.01**	98.94	0.56
60 min	Alburno	28.94**	-0.22*	1.28**	-0.01(ns)	-0.01**	99.55	1.06
	Cerne	87.50**	-7.51*	0.13(ns)	0.20(ns)	0.01*	93.82	2.74
90 min	Alburno	42.23**	-1.71*	0.99**	0.02(ns)	0.01**	98.77	0.98
	Cerne	45.90*	-2.56*	-0.17*	0.07(ns)	0.01**	93.82	1.96

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

Figura 12 - Perfis de temperatura da madeira de alburno e cerne dos toretes com 20 cm de comprimento



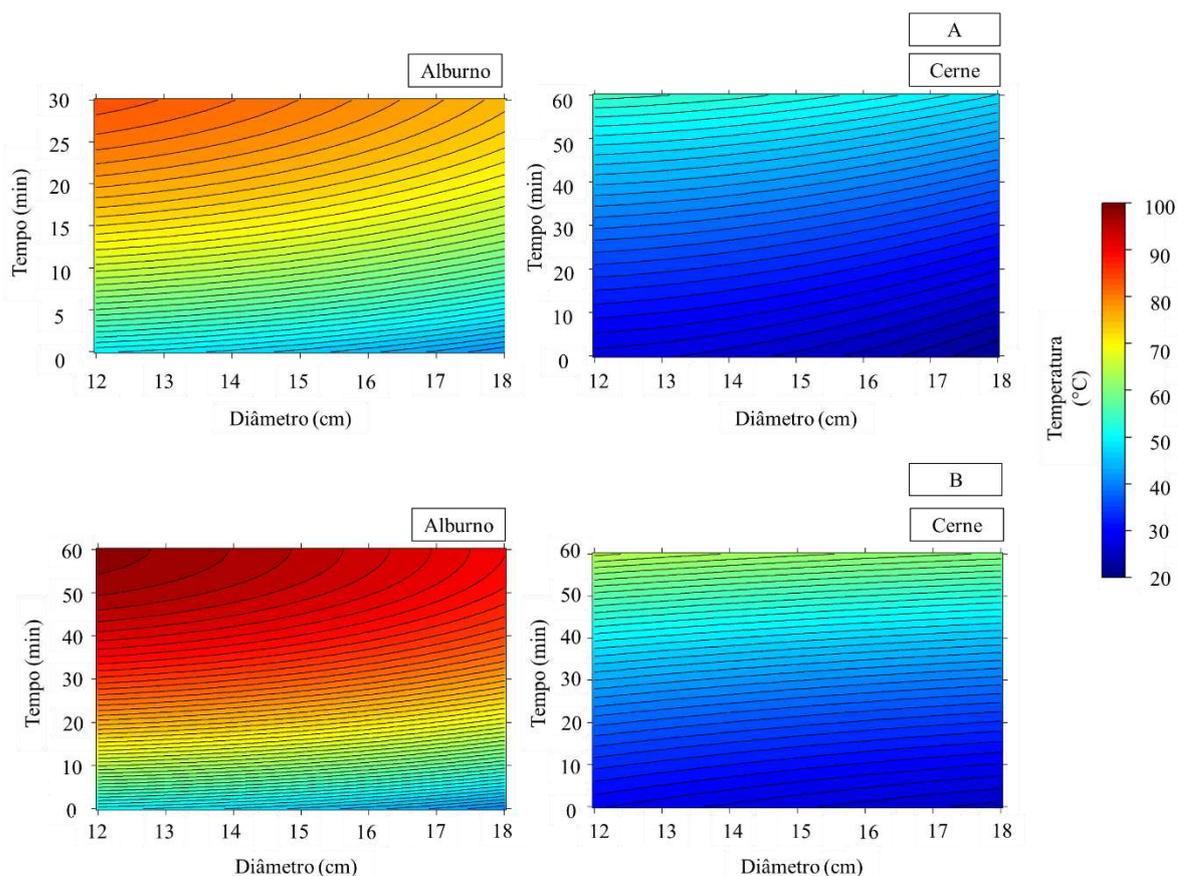
Legenda: A – tempo de residência de 30 minutos; e B – tempo de residência de 60 minutos.

Tabela 2 – Estatística associada a equação ajustada

Tempo de residência	Posição radial na madeira	Temperatura (°C) = $\beta_1 + \beta_2 \cdot D + \beta_3 \cdot T + \beta_4(D^2) + \beta_5(T^2)$					R ²	S _{y,x}
		β_1	β_2	β_3	β_4	β_5		
30 min	Alburno	44.41**	-1.60*	1.53**	0.03(ns)	-0.01**	99.64	0.99
	Cerne	62.69**	-4.64*	-0.07(ns)	0.13(ns)	0.01**	96.52	1.34
60 min	Alburno	107.15**	-9.89**	1.16**	0.31**	-0.01**	98.91	1.78
	Cerne	42.1**	-2.11(ns)	0.16**	0.05*	0.01**	99.31	1.06

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

Figura 13 - Perfis de temperatura da madeira de alburno e cerne dos toretes rachados



Legenda: A – tempo de residência de 30 minutos; e B – tempo de residência de 60 minutos.

Tabela 3 – Estatística associada a equação ajustada

Tempo de residência	Posição radial na madeira	Temperatura (°C) = $\beta_1 + \beta_2 \cdot D + \beta_3 \cdot T + \beta_4(D^2) + \beta_5(T^2)$						
		β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R ²	S _{y.x}
30 min	Alburno	18.31 (ns)	2.18**	2.44**	-0.12 (ns)	-0.03**	99.44	1.21
	Cerne	9.11 (ns)	2.54*	0.44 (ns)	-0.12 (ns)	0.01 (ns)	95.61	2.65
60 min	Alburno	20.20**	2.61**	1.87**	-0.13**	-0.01**	98.91	1.78
	Cerne	41.20**	-1.59*	0.25**	0.03 (ns)	0.01**	99.31	1.06

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

As equações ajustadas referentes aos modelos que melhor explicaram a variação temperatura do alburno e do cerne da madeira, em função do diâmetro da madeira e tempo de residência de secagem, para os layouts de corte analisados (Tabela 1, 2 e 3), apresentaram satisfatórios erro padrão residual (S_{y.x}) e coeficiente de determinação ajustado (R²).

As temperaturas das regiões do alburno dos toretes, apresentaram valores superiores a temperatura do cerne (Figuras 11, 12 e 13). Na secagem artificial da

madeira, a energia térmica presente no gás combusto é transferida para a região superficial da madeira, promovendo a vaporização da água, e o aquecimento da madeira nessa região, o que caracteriza o início da transferência de calor para o centro da peça (67, 71, 72).

A madeira naturalmente apresenta baixa condutividade térmica e elevado calor específico, o que resulta em uma baixa taxa de transferência de calor, em comparação a outros materiais (67). Logo, para que ocorra o aquecimento das regiões mais internas da madeira, onde está localizado o cerne, um maior tempo de residência no secador é requerido. Em relação aos perfis de temperatura do alburno e do cerne, observa-se que o diâmetro do torete e o tempo de residência, influenciaram o aquecimento do alburno e cerne, para os layouts de corte avaliados (Figuras 11, 12 e 13).

Os toretes de maior diâmetro, independentemente do layout de corte, tiveram os menores aquecimentos do alburno e do cerne (Figuras 11, 12 e 13). Toretos de maior diâmetro são naturalmente mais resistentes à transferência de calor convectiva do gás para a madeira, em comparação aqueles de menores diâmetros, uma vez que a condutividade térmica longitudinal em uma peça de madeira é de $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ maior que a transversal (5, 61, 73).

Já o aumento da temperatura da madeira observado nas secagens com maior tempo de residência, é devido, principalmente, ao maior tempo de exposição a fonte de calor, o que resulta, por sua vez, em uma melhor transferência de calor na madeira por meio do aumento da sua condutividade térmica (74).

Dentre os layouts de corte, a madeira rachada foi o que apresentou um maior aquecimento nas regiões do alburno e cerne (Figuras 11, 12 e 13). Quando comparado o aquecimento do alburno, nas secagens de 60 min de tempo de residência, verifica-se que os toretes rachados, em média, aqueceram 30% a mais que os toretes no layout de 40 cm, nestas mesmas condições. Já na região do cerne, observa-se que os toretes rachados, em média, aqueceram 20% mais que os toretes no layout de 40 cm, no tempo de residência de 60 min.

A proporção de troca de temperatura entre o gás quente e o torete é diretamente proporcional a área de madeira disponível para a transferência de calor por convecção (67). Uma vez que a madeira rachada tem uma maior área de contato com o gás (Figura 8), cerca de 40% superior ao torete de 20 cm de comprimento, já

era esperado essa melhor transferência de calor neste layout de corte em comparação aos demais layouts.

Para os toretes rachados, comprimento de 20 cm, e submetidos aos programas de secagem com tempo de residência de 90 min, observou-se durante a realização do ensaio, que houve um princípio de combustão da madeira no secador. Para ambos os layouts de corte, a utilização de elevadas temperaturas em conjunto com um tempo de residência próximo de 90 min, resultou na formação de uma superfície externa seca da madeira. Acredita-se que a taxa de condução da água do interior para a parte externa da peça e do calor da região externa para a interna, foi menor que a sua capacidade de absorção de calor do gás combusto, o que resultou em um maior aquecimento da superfície das peças, propiciando, assim, a ignição do material.

4.2. Perda de umidade da madeira e taxa de secagem

A perda de umidade e taxa de secagem, em função do tempo de residência e diâmetro dos toretes, para os diferentes layouts de corte, estão apresentados na Figura 14. A estatística associada ao modelo que melhor explicou a perda de umidade e taxa de secagem, estão apresentados na Tabela 4.

Figura 14 - Perda de umidade relativa e taxa de secagem, em função do tempo de residência e diâmetro dos toretes

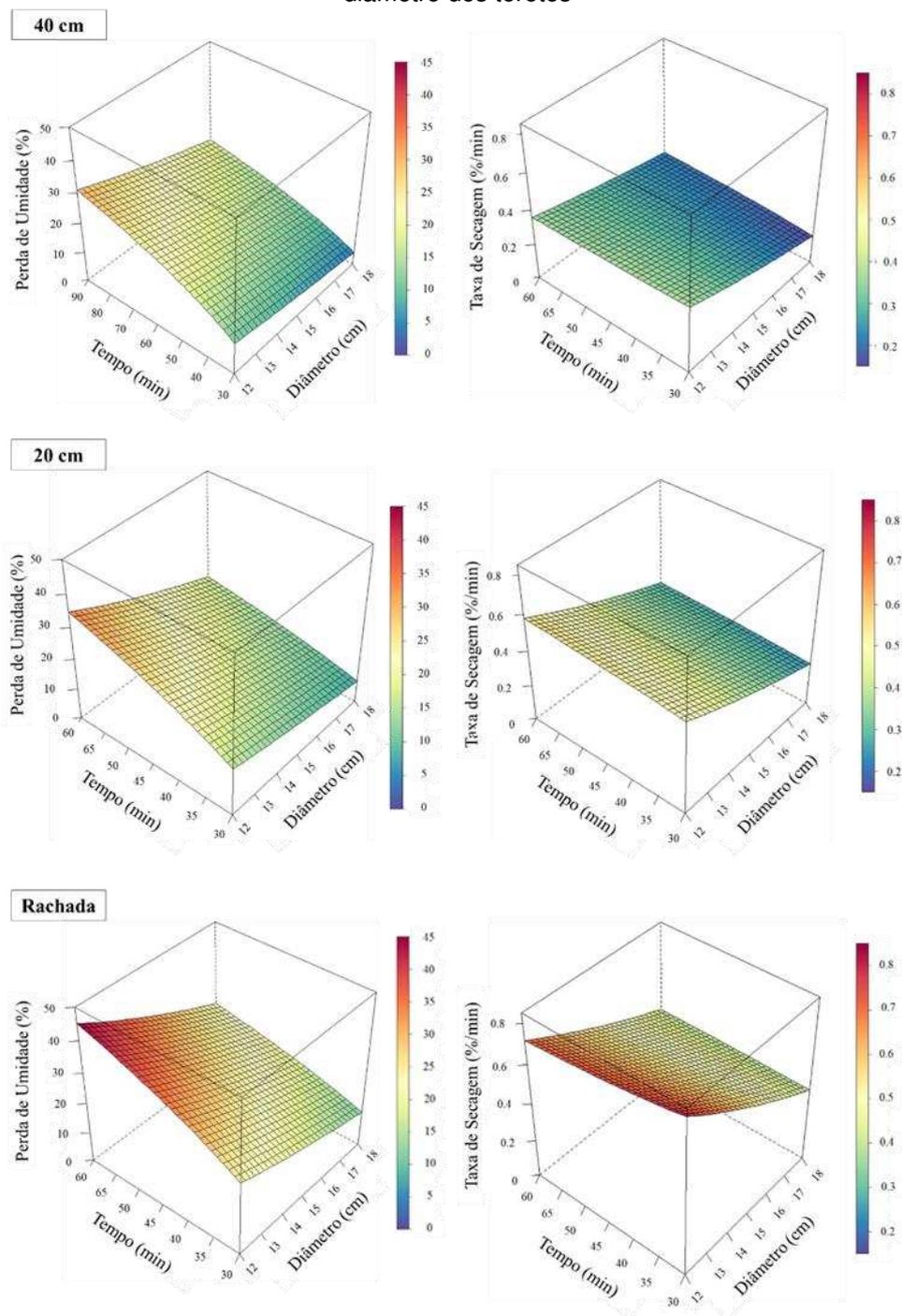


Tabela 9 - Estimativas dos parâmetros e medidas de precisão da equação ajustada

Layout de corte	Perda de umidade (%) = $\beta_1 + \beta_2(\ln(D)) + \beta_3^*(\ln(T)) + \beta_4(\ln(D*T))$					
	β_1	β_2	β_3	β_4	R ²	S _{y.x}
40 cm	-314,66**	95.22**	112.52**	-34.19**	97.25	1.63
20 cm	-129.66**	31.61**	53.37**	-14.13**	98.16	1.15
Rachada	-262.57**	74.3**	107.46**	-31.13**	96.74	2.11
Layout de corte	Taxa de secagem (%) = $\beta_1 + \beta_2(\ln(D)) + \beta_3^*(\ln(T))$					
	β_1	β_2	β_3	β_4	R ²	S _{y.x}
40 cm	1.41**	-0.44**	0.01 ^(ns)	-	90.43	0.29
20 cm	2.09**	-0.72**	0.06**	-	94.11	0.39
Rachada	3.32**	-0.96**	-0.03*	-	91.23	0.20

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

As equações ajustadas referentes aos modelos que melhor explicaram perda de umidade dos toretes, em função do diâmetro da madeira e tempo de residência de secagem, para os layouts de corte analisados (Tabela 9), apresentaram satisfatórios erro padrão residual (S_{y.x}) e coeficiente de determinação ajustado (R²).

Observa-se que maiores tempos de residência, independente do layout de corte e diâmetro do torete, resultaram em maior perda de umidade. O aumento do tempo de residência da madeira no secador implica em maior tempo de exposição a fonte de calor, que propiciará maior aquecimento da madeira (Figuras 9, 10 e 11), que por sua vez, implica no aumento da possibilidade de um maior número de moléculas de água adquirirem energia suficiente para sua evaporação (75).

Para os valores de taxa de secagem, nos toretes de 40 cm de comprimento, ao contrário dos demais layouts de corte, não foi observado o efeito do tempo de residência. A temperatura interna da madeira exerce expressiva função na dinâmica de translocação de água e conseqüentemente na taxa de secagem da madeira. A água na madeira coexiste em equilíbrio termodinâmico em três formas diferentes, água livre, água de impregnação e vapor (76). A velocidade de movimentação da água livre na madeira, por meio da capilaridade, é inversamente proporcional a sua viscosidade, logo quanto maior temperatura interna, menor será a viscosidade da água, o que facilita sua translocação na madeira. Quando se trata da água na forma de vapor, seu coeficiente de difusão pode ser expresso em função da temperatura, em que a energia de ativação desta água é proporcional a entalpia de vaporização.

Os menores diâmetros tiveram maiores perdas de umidade e taxas de secagem, independente do layout de corte. Toretos de maiores diâmetro, apresentam um alongamento da distância a ser percorrido pela água no sentido axial, em

comparação aqueles de menores diâmetro e comprimento (77). A perda de água da madeira no seu sentido longitudinal é maior em relação ao radial e tangencial, uma vez que a permeabilidade e condutividade térmica são superiores neste sentido (74).

A permeabilidade, por sua vez, refere-se à capacidade com que fluidos se movimentarem em um material. De forma geral, a permeabilidade da madeira tende a ser 100 vezes maior no sentido longitudinal, em comparação ao radial e tangencial, assim, o aumento do diâmetro significa diminuição da permeabilidade do torete. Um dos fatores que mais afetam a permeabilidade da madeira é a sua estrutura anatômica, especialmente a relação entre cerne e alburno (78, 79).

O processo de cernificação na madeira é caracterizada pela deposição de metabólitos secundários, conhecidos como extrativos, incluindo resinas, óleos, taninos e formação de tiloses Côté (80). Assim presença de extrativos e tiloses no cerne, fazem com que os vasos sejam obstruídos, resultando no aumento significativo da resistência ao fluxo nestas regiões, em comparação ao alburno (81, 82).

Entre os layouts de cortes, a madeira rachada apresentou as maiores perdas de umidade relativa e taxas de aquecimentos, com valores 50% superiores, aproximadamente, quando comparados a madeira de 40 cm de comprimento. Na madeira rachada, a maior área de superfície em contato com o gás (Figura 8) e exposição da região do cerne da madeira potencializaram a transferência térmica e por consequência o aquecimento na madeira rachada, em comparação aos demais layouts de corte. Neste sentido, há uma maior disponibilidade de energia para vaporização da água na madeira, o que resulta em uma maior taxa de secagem e perda de umidade. Além disto, neste layout, ocorreu uma facilidade de saída da água, novamente, por apresentar uma área de superfície maior disponível para a sua liberação.

4.3. Perfil de umidade

O perfil de umidade dos toretes, em função do diâmetro, região e tempo de residência de secagem, para os diferentes layouts de corte, estão apresentados nas Figura 15, 16 e 17.

Figura 15 - Perfis de umidade em função do diâmetro (12, 14, 16 e 18 cm), região (P2, C e P1) e tempo de secagem (30, 60 e 90 cm), dos toretes de 40 cm de comprimento

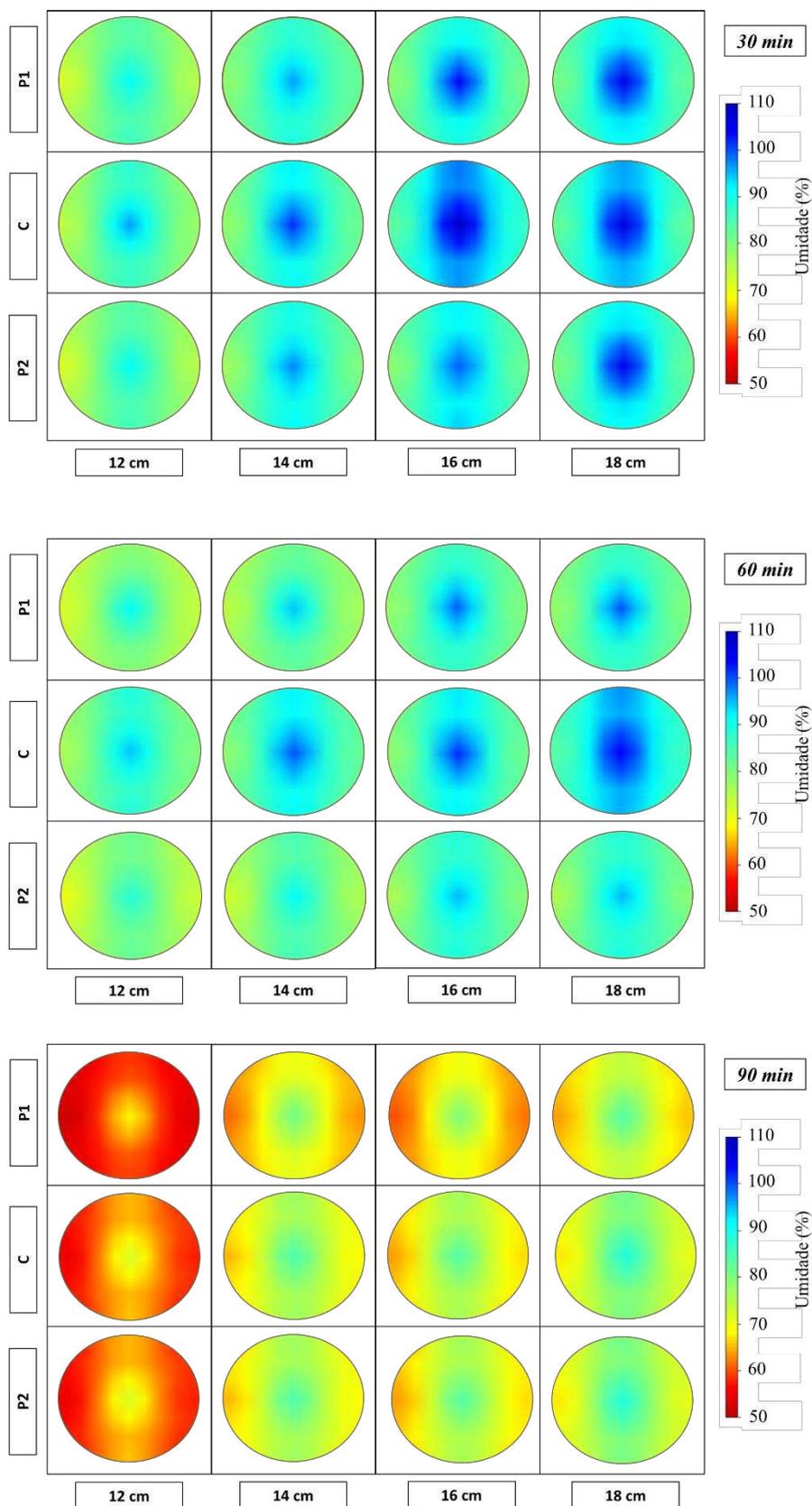


Figura 16 - Perfis de umidade em função do diâmetro (12, 14, 16 e 18 cm), região (P2 e P1) e tempo de secagem (30 e 60 cm), dos toretes de 20 cm de comprimento

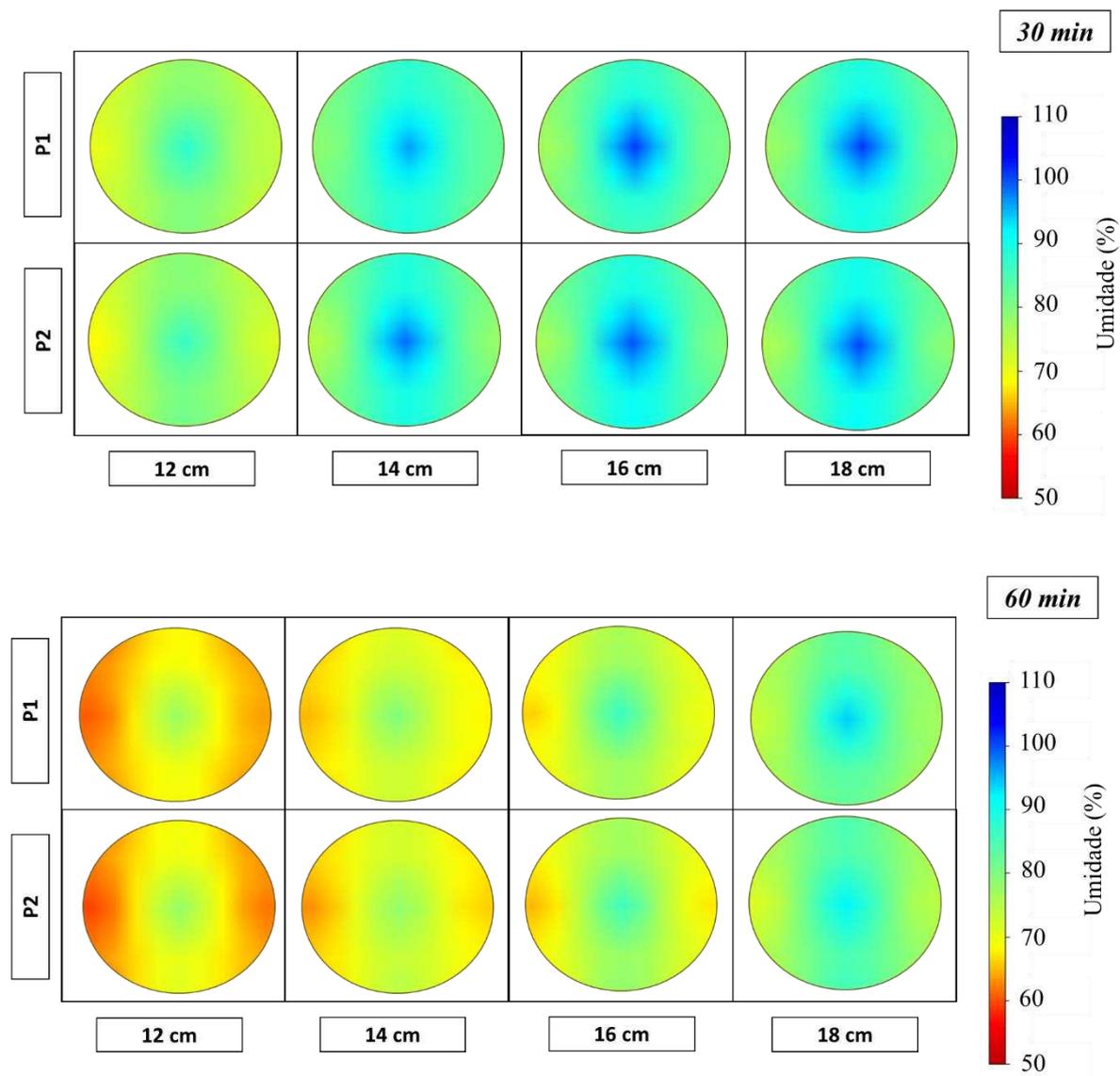
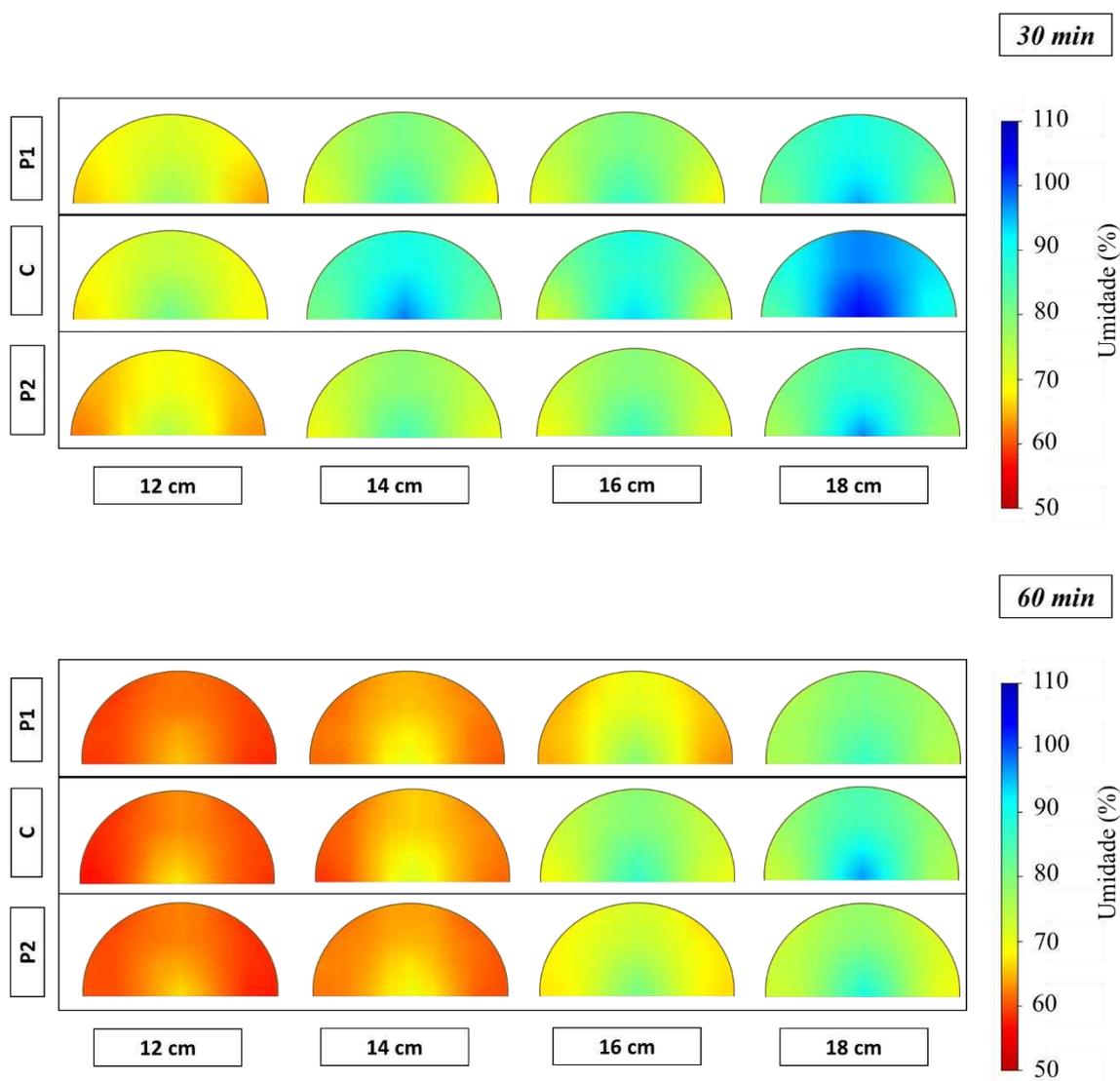


Figura 17 - Perfis de umidade em função do diâmetro (12, 14, 16 e 18 cm), região (P1, C e P2) e tempo de secagem (30 e 60 min), dos toretes rachados



Observa-se em todos os tratamentos avaliados a formação de um gradiente de umidade no sentido medula casca dos toretes. De acordo Suchomelova *et al.* (83), a formação de gradientes de umidade ocorre naturalmente durante a secagem, uma vez que são inerentes a dinâmica de movimentação da água na madeira. Quando um gradiente de temperatura é gerado, como ocorre na secagem em altas temperaturas da madeira, partículas de água tendem a se mover entre as regiões de maior e menor temperatura, gerando também um gradiente de concentração de água (74). Portanto,

os gradientes de concentração de umidade e de temperatura, são considerados uma força motriz da transferência de calor e massa durante o processo de secagem (83).

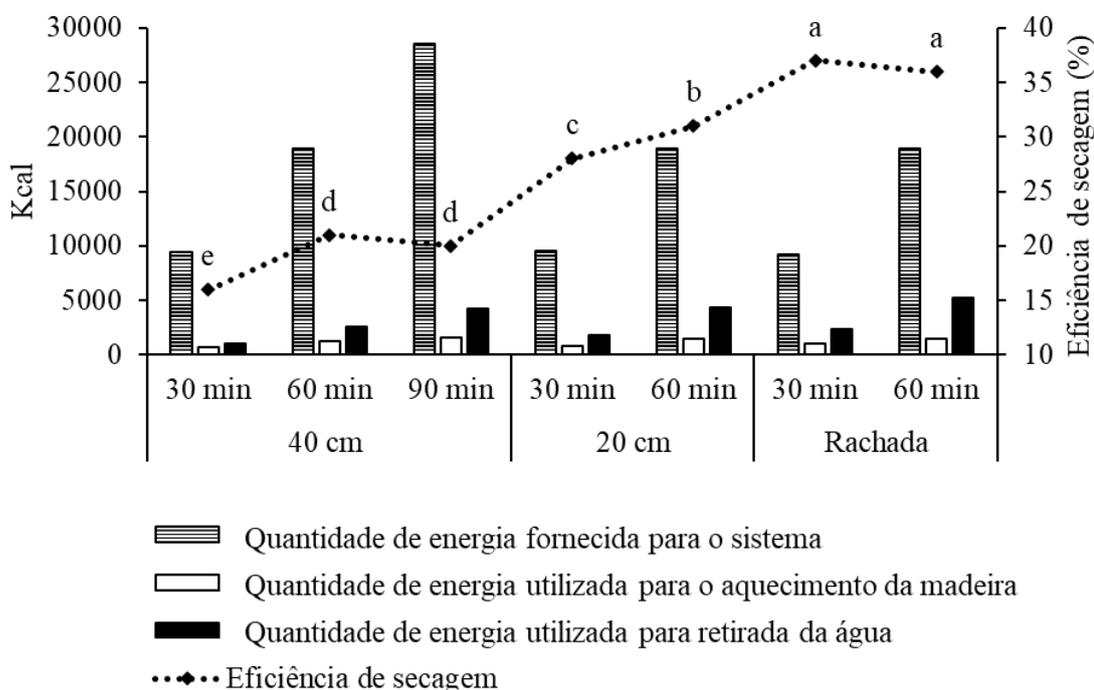
No layout de corte de 40 cm é possível observar a região central dos toletes (C) apresentou um teor de umidade superior as regiões externas (P1 e P2), independente do diâmetro e do tempo de secagem. Em contrapartida, os layouts de 20 cm e rachada não apresentaram esta heterogeneidade no teor de umidade das peças.

Os toletes rachados de 12 cm de diâmetro, submetidos a um tempo de residência de 60 min, apresentaram uma maior homogeneidade na distribuição do teor de umidade pós-secagem, em comparação aos demais tratamentos. A maior área de superfície de contato com o gás deste tratamento, potencializou a transferência térmica, e por consequência, propiciou uma maior disponibilidade de energia para vaporização da água na madeira, o que resulta em uma maior taxa de secagem e perda de umidade.

4.4. Eficiência da secagem

A eficiência da secagem, assim como a quantidade de calor fornecida para aquecimento da madeira e para remoção de água, de acordo com o tempo de residência, para os layouts de corte avaliados, está apresentada na Figura 18.

Figura 18 - Eficiência de secagem, de acordo com os layouts de corte, em função do tempo de residência de secagem



Legenda: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A eficiência energética de secagem indica como os toretes de madeira aproveitaram a energia disponível no secador para seu aquecimento e perda de umidade. Os toretes rachados apresentaram a melhor eficiência energética de secagem (Figura 18), em relação aos demais layouts de corte.

A maior área de contato da madeira com a fonte de calor no torete rachado propiciou seu melhor aquecimento (Figura 8), e conseqüentemente resultou em uma maior taxa de secagem e perda de umidade, garantindo, portanto, uma elevada eficiência energética da secagem, em comparação aos toretes de 20 e 40 cm de comprimento.

Assim, toretes que apresentam uma melhor eficiência energética de secagem, conseqüentemente, irão contribuir para otimização no balanço energético da carbonização, por meio, principalmente, da inserção de uma menor quantidade de água no processo de carbonização.

Na carbonização da madeira, em retortas contínuas, a primeira etapa do processo consiste no direcionamento de parte da energia disponível no reator para a evaporação da água presente na madeira, logo, a utilização de madeiras com

elevados teores de umidade resultam em um maior dispêndio energético para a secagem destes toretes. Segundo Diego *et al.* (58), a taxa de desvolatilização da madeira úmida pode ser três vezes menor que a da madeira seca. Assim, conseqüentemente, um maior tempo de residência da madeira no processo será necessário, o que significa um tempo de carbonização de maior duração, o que implica em perdas em rendimento e produtividade (4).

Alterações nas propriedades mecânicas do carvão vegetal são também observadas na carbonização de madeiras com elevados teores de umidade. As pressões e tensões mecânicas ocasionadas pela liberação rápida de gases e vapores de água, podem propiciar a formação de trincas no carvão vegetal (56, 59, 60, 61). Assim, o carvão vegetal produzido nestas condições tende a ser mais friáveis e quebradiços, o que resulta na diminuição da qualidade do mesmo como matéria-prima em processo siderúrgicos e tendência maior a gerar finos (1, 10).

Outra possível vantagem da secagem artificial de toretes de madeira, em retortas contínuas, é a possibilidade de utilização de uma madeira previamente aquecida na entrada do reator, o que favorece os estágios iniciais de carbonização. Assim, quanto mais rápido o torete submetido a secagem artificial for inserido no reator, maior será a temperatura contida na peça de madeira. Os efeitos do aquecimento dos toretes podem estar associados a uma demanda menor de energia na fase inicial da pirólise, contribuindo também para o balanço de energia do reator. Além disto, a condutividade térmica da madeira é diretamente influenciada pela sua temperatura, o que implica que os toretes aquecidos apresentaram uma menor resistência a transferência de calor, em relação aos toretes com condições normais de temperatura. Assim, a economia energética e a diminuição da resistência térmica dos toretes de madeira impactam diretamente na produtividade do reator contínuo de carbonização.

5. CONCLUSÕES

O secador protótipo de leito fixo é eficiente para avaliação da secagem em altas temperaturas para toretes de madeira em diferentes layouts de corte. Assim, é um equipamento que permite simular a secagem de toretes em que a madeira exposta diretamente ao gás, o que fornece subsídios para o desenvolvimento e dimensionamento para secadores industriais, principalmente voltados para a utilização em retortas contínuas de carbonização.

Os toretes rachados e de 20 cm de comprimento, no programa de secagem de tempo de residência de 90 min, entraram em combustão no secador.

O torete rachado apresentou um maior aquecimento da região do alburno e cerne, em relação aos demais layouts de corte. A melhor transferência de calor e aproveitamento de energia térmica disponível no sistema deste layout de corte, em comparação aos demais, propiciou uma maior taxa de secagem e perda de umidade, que por sua vez, impactou diretamente sua eficiência de secagem.

Em todos os tratamentos avaliados ocorreu a formação de um gradiente de umidade no sentido medula casca dos toretes após a secagem. No entanto, foi observado uma redução desta heterogeneidade nos toretes rachados de 12 cm de diâmetro, submetidos a um tempo de residência de secagem de 60 minutos.

REFERÊNCIAS

- (1) CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M.; FIGUEIRO, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; DONATO, D. B. Impact of Wood Moisture in Charcoal Production and Quality. **Floresta e Ambiente**, v.27, n.1, p.2-7, 2020.
- (2) HASAN, M.; HU, X.; GUNAWAN, R.; LI, C. Pyrolysis of large mallee wood particles: Temperature gradients within a pyrolysing particle and effects of moisture content MD. **Fuel Processing Technology**, v.158, p. 163–171, Jan. 2017.
- (3) CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; 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 Florestalis**, v.44, n.112, p.831-840, 2016.
- (4) MISSIO, L. A.; MATTOS, B. D.; GATTO, D. A.; LIMA, E. A. Thermal analysis of charcoal from fast-growing eucalypt wood: influence of raw material moisture content. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v.34, n.3, p.191-201, 2013.
- (5) RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do Eucalyptus spp.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2004.
- (6) 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**, v.33, n.74, p.137-149, 2013.
- (7) FIGUEIRO, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, G. R.; CARNEIRO, A. P. S.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, M. S.; CASTRO, V. R. Caracterização do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, n.3, p.1-8, 2019.
- (8) JESUS, M. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; MARTINEZ, C. L. M.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. P. S.; ASSIS, M. R. Thermal decomposition fundamentals in large-diameter wooden logs during slow pyrolysis. **Wood Science and Technology**, v.53, n.6, p.1353-1372, 2019.
- (9) OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O. C.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRO, C. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A. Eucalyptus logs drying at high temperatures. **Revista árvore**, v.41, n.2, p.1-9, 2017.
- (10) ZANUNCIO, A. J. V.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; ANDRADE, H. B.; CARVALHO, A. G. Drying biomass for energy use of Eucalyptus urophylla and Corymbia citriodora Logs. 2013b. **BioResources**, v.8, n.4, p.5159-5168, 2013.
- (11) CARDOSO, M. T. **Secagem de toras para produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases de carbonização.** 2015. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.
- (12) OLIVEIRA, A. C. **Secagem de toras de eucalipto.** 2015. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.
- (13) BRAZ, R. L., DUARTE, A. P. C., OLIVEIRA, J. T. DA S., MOTTA, J. P., ROSADO, A. M. Curva Característica de Secagem da Madeira de Tectona grandis e Acacia mangium ao Ar Livre. **Floresta E Ambiente**, v.22, n.1, p.117–123, 2015.
- (14) FIGUEIRO, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; RIBEIRO, G. B. D. Wood dryers: a sustainable alternative for increased charcoal production. **Revista Floresta**, v.50, n.1, p.943-952, 2020.
- (15) MENDES, F.; LATORRE, F. L.; SOARES, L.; AZEVEDO, F.; SAMPAIO, R. A tecnologia Carboval de produção integrada do carvão vegetal siderúrgico. In: 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 17º Simpósio

- Brasileiro de Minério de Ferro e 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro. **Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**, p. 221-230, 2016.
- (16) FALEIRO, R. M. R.; SAMPAIO, R. S.; VELLOSO, C. M.; AZEVEDO, F. R. S.; LATORRE, F. L. Carbonização contínua: simulação do consumo de carvão vegetal no alto-forno 1 da Vallourec Tubos do Brasil. In: 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 17º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro. **Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**, p. 578-587, 2016.
- (17) LATORRE, F. L.; MENDES, F.; SOARES, L.; SAMPAIO, R. A carbonização continua - Carboval e a cogeração de energia. In: 47º Seminário de Redução de Minérios E Matérias-Primas. **Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**, p. 180-191, 2017.
- (18) FALEIRO, R. M. R.; VELLOSO, C. M.; SAMPAIO, R. S.; AZEVEDO, F. R. S.; LATORRE, F. L. CARBONIZAÇÃO CONTÍNUA: PERFORMANCE DE UM ALTO-FORNO. In: 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 17º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro. **Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**, p. 569-577, 2016.
- (19) FIGUEIRO, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; da SILVA, C. M. S.; PERES, L. C. Energetic valorization of sawmill waste through slow pyrolysis. **Revista Floresta**, v. 49, p. 109-116, 2018
- (20) KAJINA, W.; JUNPEN, A.; GARIVAIT, S.; KAMNOET, O.; KEERATIISARIYAKUL, P.; ROUSSET, P. Charcoal production processes: an overview. **Journal of Sustainable Energy & Environment**, v.10, p.19-25, 2019.
- (21) PEREIRA, E. G.; MARTINS, M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O. Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.75, p.592-600, 2017.
- (22) OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v.8, p. 4574-4592, 2013.
- (23) MOHAN, D.; PITTAM, C. U; STELLE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy and Fuels**, v.20, p.848-889, 2006.
- (24) COOMES, O. T.; MILTNER, B. C. Indigenous charcoal and biochar production: potential for soil improvement under shifting cultivation systems. **Land Degradation & Development**, n.28, v.3, p.811-821, 2017.
- (25) TRAN, K. Q.; ALONSO, M. Z.; WANG, L.; SKREIBERG, Ø. Simultaneously boosting the mass and fixed-carbon yields of charcoal from forest residue via atmospheric carbonization. **Energy Procedia**, v.792, p.787-792, 2017.
- (26) SUTAR, K. B.; KOHLI, S.; RAVI, M. R.; RAY, A. Biomass cookstoves: A review of technical aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.41, p.1128-1166, 2015.
- (27) NOBRE, J. R. C.; PAZ CASTRO, J.; BIANCHI, M. L.; BORGES, W. M.S.; TRUGILHO, P. F.; MOULIN, J.; NAPOLI, A. Caracterização do carvão ativado produzido a partir de serragens de maçaranduba. **Scientia Forestalis**, n.43, v.107, p.693-702, 2015.
- (28) FELICIANO-BRUZUAL, C. Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO2 reduction potential and economic prospects. **Journal of Materials Research and Technology**, n.3, v.3, p.233-243, 2014.

- (29) FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO. **Recovery of by-products from hardwood carbonization [Chapter 12]**. Disponível em <http://www.fao.org/docrep/X5328E/x5328e0d.htm>. Acessado em 10 de fevereiro de 2022.
- (30) MWAMPAMBAA, T. H.; OWEN, M.; MAURICE, P. Opportunities, challenges and way forward for the charcoal briquette industry in Sub-Saharan Africa. **Energy for Sustainable Development**, v.17, n.2, p.127-137, 2013.
- (31) BROBBEYA, K. B.; HANSEN, C. P.; BOATENG, K.; POULIO, M. The economic importance of charcoal to rural livelihoods: Evidence from a key charcoal-producing area in Ghana. **Forest Policy and Economics**, v.19, p.19-31, 2019.
- (32) ZULU, L. C.; RICHARDSON, R. B. Charcoal, livelihoods, and poverty reduction: Evidence from sub-Saharan Africa. **Energy for Sustainable Development**, v.17, n.2, p.127-137, 2013.
- (33) RODRIGUES, T.; BRAGHINI, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.143, p.1-16, 2019.
- (34) Sindicato da Indústria de Ferro no Estado de Minas Gerais - SINDIFER. **Anuário estatístico 2017**. 26p, 2020.
- (35) NORGATE, T.; HAQUE, N.; SOMERVILLE, M.; JAHANSHAH, S. The greenhouse gas footprint of charcoal production and of some applications in steelmaking. **Australian Conference on Life Cycle Assessment**, p.1-12, 2011.
- (36) INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES– IBA. 2022. **Relatório 2022: ano base 2021**. 80p., 2022.
- (37) FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FAO. **The charcoal transition – Greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods**. 184 p., 2017.
- (38) MOUSA, E.; WANG, C.; RIESBECK, J.; LARSSON, M. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.65, p.1247-1266, 2016.
- (39) CAVALIERE, P.; PERRONE, A.; TAFURO, P.; PRIMAVERA, V. Reducing emissions of PCDD/F in sintering plant: Numerical and experimental analysis. **Ironmak Steelmak**, v.38, n.6, p.422-431, 2011.
- (40) KASAI, E.; HOSOTANI, Y.; KAWAGUCHI, T.; NUSHIRO, K.; AONO, T. Effect of additives on the dioxins emissions in the iron ore sintering process. **ISIJ Int**, v.41, n.1, p.93-97, 2001.
- (41) INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES– IBA. 2019. **Relatório 2018: ano base 2019**. 80 p. 2020.
- (42) SANTOS, I. S. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão Vegetal**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2017.
- (43) RAAD, T. J.; MELO, V. F.; OLIVERIA, A. C. Fornos metálicos para produção de carvão vegetal. **III Fórum Nacional Sobre Carvão Vegetal**, 2014.
- (44) DONATO, D. B.; **Desenvolvimento e avaliação de fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 98p. 2017.
- (45) LANA, A. Q.; **Desenvolvimento e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 69p. 2014.
- (46) OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 74p. 2012.

- (47) 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**, v.16, p.115-124, 2010.
- (48) ORGANIZAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS, ONU BRASIL. 2017. **FAO aponta necessidade de tornar produção de carvão vegetal mais sustentável**. Disponível em. Acesso em 10 de fevereiro de 2022.
- (49) PARK, W. C.; ATREYA, A.; BAUM, H. R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. **Combustion and flame**, v.157, n.3, p.481-497, 2010.
- (50) SIQUEIRA, H. F. **Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira e produção de carvão vegetal**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 116p. 2021.
- (51) CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil – Subsídios para revisão do Plano Siderurgia**. – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015.
- (52) QURESHI, K. M.; LUP, A. N. K.; KHAN, S.; ABNISA, F.; DAUD, W. A. W. A technical review on semi-continuous and continuous pyrolysis process of biomass to bio-oil. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.131, p.52-75, 2018.
- (53) GARCIA-NUNEZ, J. A.; PELAEZ-SAMANIEGO, M. R.; GARCÍA-PÉREZ, M. E.; FONTS, I.; ABREGO, J.; WESTERHOF, R. J. M.; GARCIA-PEREZ, M. Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review. **Energy Fuels**, v.31, n.6, p.5751–5775, 2017.
- (54) ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; Lima, F. S. Secagem ao ar livre da madeira para produção de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.3; p.401-408, 2014.
- (55) SHEN, D.K.R.; GU, S.; LUO, K.H.; BRIDGWATER, A.V. Analysis of Wood Structural Changes under Thermal Radiation. **Energy & Fuels**, v,23, p.1081–1088, 2009.
- (56) DI BLASI, C.; BRANCA, C.; SANTORO, A.; HERNANDEZ, E. G. Pyrolytic behavior and products of some wood varieties. **Combustion and Flame**, v.124, 1-2, p.165-177, 2001.
- (57) URKAN, M. K.; ALKOL, M. Burning times of volatiles from Turkish coals during fluidized bed combustion. **Fuel**, v.73, n.5, p. 768-772, 1994.
- (58) DE DIEGO, L.F.; GARCÍA-LABIANO, F.; ABAD, A.; GAYÁN, P.; ADÁNEZ, J. Effect of moisture content on devolatilization times of pine wood particles in a fluidized bed. **Energy & Fuels**, v.17, n.2, p.285–290, 2003.
- (59) ZENG, K.; GAUTHIER, D.; Li, R.; FLAMANT, G. Combined effects of initial water content and heating parameters on solar pyrolysis of beech wood. **Energy**, v.125, p.552-561, 2017.
- (60) DI BLASI, C.; GALGANO, A.; BRANCA, C.; CLEMENTE, M. Analysis of the interactions between moisture evaporation and exothermic pyrolysis of Hazelnut Shells. **Energy & Fuel**, v.30, n.10, p.7878-7886, 2016.
- (61) HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S.; KUCUKBAYRAK, S. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v.7, n.91, p.759-764, 2010.
- (62) COPAM – CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – MG. **Deliberação Normativa COPAM nº 227**, de 29 de Agosto de 2018.
- (63) PERRÉ, P.; KEEY, R. B. **Drying of Wood: Principles and Practices**. Taylor & Francis Group, 58p, 2006.
- (64) NERI, A. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SILVA, A. F.; SOUZA, A. L.; FERREIRA, W. G.; MEIRA, J. A. A. The influence of soils on the floristic composition and community

- structure of an area of brazilian cerrado vegetation. **Edinburgh journal of botany**, v.69, n.1, p.1–27, 2012.
- (65) SOUZA, P. B.; ALVES, J. A.; SILVA, A. F.; SOUZA, A. L. Composição florística da vegetação arbórea de um remanescente de cerradão, Paraopeba, MG. **Revista Árvore**, v.32, n.4, p.781-790, 2008.
- (66) SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse. Syracuse University Press, n.4, 218p. 1972.
- (67) KOLLMAN FFP, CÔTÉ WA. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, v.1, 592 p. 1968.
- (68) DIXON, D.; UDDAMERI, V. **Gis and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering, first edition**. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, UK, 2016.
- (69) R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2017.
- (70) PEBESMA, E.J. Multivariable geostatistics in R: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v.30, p.683-691, 2004.
- (71) 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.
- (72) JANKOWSKY, I. P.; LUIZ, M. G. Review of Wood Drying Research in Brazil: 1984–2004. **Drying Technology**, v.24, p.447-455, 2006.
- (73) BABU, B. V.; CHAURASIA, A. S. Heat transfer and kinetics in the pyrolysis of shrinking biomass particle. **Chemical Engineering Science**, v.59, n.10, p.1999-2012, 2004.
- (74) SIAU, J.F. **Flow in wood**. Syracuse. Syracuse University Press. 131 p. 1971. (Syracuse Wood Science Series, 1).
- (75) CECH, M.Y. & PFAFF, F. **Kiln operator's manual of Eastern Canada**. Ontario, Eastern For. Prod, Lab., 189 p. 1977.
- (76) STANISH, M.A. The roles of bound water chemical potential and gas phase diffusion in moisture transport through wood. **Wood Science and Technology**, v.19, p.53-70, 1986.
- (77) BYRNE, C.E., NAGLE, D.C. **Carbonization of wood for advanced materials applications**. Carbon N. Y. v.35, p.259–266,1991.
- (78) HEIN, P.R.G., CHAIX, G., CLAIR, B., BRANCHERIAU, L., GRIL, J. Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along Eucalyptus trunks grown under contrasting growth conditions. **Trees**, v.30, p.871–882, 2016.
- (79) COUTINHO, A.R.; FERRAZ, E.S.B. **Determinação da friabilidade do carvão vegetal. Em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização**. IPEF, Piracicaba, n.38, p.33- 37, 1988.
- (80) COMSTOCK G.L., CÔTÉ W.E. Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood. **Wood Science and Technology**, v.2, p.279-291, 1968.
- (81) RESENDE, R. T., CARNEIRO, A. C. O., FERREIRA, R. A. D. C., KUKI, K. N., TEIXEIRA, R. U., ZAIDAN, U. R., SANTOS, R. D., LEITE, H. G., RESENDE, M. D. V. Air-drying of eucalypts logs: Genetic variations along time and stem profile. **Industrial Crops & Products**, v.124, p.316-324, 2018.
- (82) JIANMIN, C., LIPING, C. An analysis of heat and mass transfer phenomenon in wood during drying. **Journal of Northeast Forestry University**, v.7, p.62–65, 1996.
- (83) SUCHOMELOVA, P.; TRCALA, M.; TIPPNER, J. Numerical Simulations of Coupled Moisture and Heat Transfer in Wood during Kiln Drying: Influence of Material Nonlinearity. **Bioresources**, v.14, n.4, p.9786-9805, 2019.