

CARLOS MIGUEL SIMÕES DA SILVA

**TORREFAÇÃO DE CAVACOS DE EUCALIPTO EM REATOR DE FLUXO
SEMI-CONTÍNUO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586t
2016
Silva, Carlos Miguel Simões da, 1990-
Torrefação de cavacos de eucalipto em reator de fluxo
semi-contínuo / Carlos Miguel Simões da Silva. – Viçosa, MG,
2016.

vii, 54f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Benedito Rocha Vital.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Madeira com combustível. 2. Madeira - Efeito da
temperatura. 3. Torrefação. 4. Energia - Fontes alternativas.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal.
II. Título.

CDD 22. ed. 662.65

CARLOS MIGUEL SIMÕES DA SILVA

**TORREFAÇÃO DE CAVACOS DE EUCALIPTO EM REATOR DE FLUXO
SEMI-CONTÍNUO**

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

APROVADA: 16 de fevereiro de 2016

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(Coorientadora)

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho

Marco Túlio Cardoso

Marcos Oliveira de Paula

Benedito Rocha Vital
(Orientador)

Enfim, como já dizia Tião Carreiro, Chora Viola!!!

AGRADECIMENTOS

Agradeço, dedico e apresento este trabalho a cada um que, direta ou indiretamente, contribuiu em algum momento para o sucesso de sua realização. Que Deus e Nossa Senhora lhes abençoem sempre.

Aos meus alicerces da vida: Dirce (Mãe), José Custódio (Pai), Emerson, Paula e Maria José (Irmãos), Maria Eduarda e Jonathan (Sobrinhos).

Aos meus alicerces dessa dissertação: Prof. Benedito Rocha Vital, Prof.^a Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Mateus Alves de Magalhães e Eder Cabral Sousa.

Aos demais que também contribuíram em etapas importantes da realização do trabalho: Emylle Veloso, Edna Mendes, Amélia Guimarães Carvalho, Francisco Bizerra, Welliton Cândido, Rafael Martins, Lucas Fialho, Clarissa Gusmão, Clara Mendoza, Humberto Fauller, Reginaldo de Pádua, Lívia Alves, Lawrence Oliveira, Danilo Donato, Bráulio Oliveira, Sálvio Teixeira, Márcio Arêdes, Juliana Jardim, Fernanda Ferreira, Fabiana Paiva, Juliana Ceccato, Larissa Carvalho, Nívea Soares, Jessica Dornelas, Solange Araújo e outros.

Aos professores Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho e Marcos Oliveira de Paula e ao Marco Túlio Cardoso pelas contribuições finais no trabalho.

Aos demais amigos e amigas do LAPEM e da Engenharia Florestal, em especial aos da ENF2009/UFV.

Aos demais que conheci em Viçosa, em Bueno Brandão e em qualquer outro lugar por onde passei.

Aos centros de ensino: Escola Estadual de Bueno Brandão e Universidade Federal de Viçosa.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Carol Máquinas (Visconde de Rio Branco – MG), Fapemig, Embrapa Florestas e Sociedade de Investigações Florestais.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1 – AVALIAÇÃO DE UM REATOR DESENVOLVIDO PARA TORREFAÇÃO DE BIOMASSA EM FLUXO SEMI-CONTÍNUO	3
RESUMO	3
1. INTRODUÇÃO	3
2. MATERIAL E MÉTODOS	4
2.1. Avaliação Experimental do Reator	7
2.2. Delineamento Experimental	9
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
4. CONCLUSÕES	17
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
CAPÍTULO 2 – ESTUDO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS PARA O TRATAMENTO TÉRMICO DE CAVACOS DE MADEIRA	20
RESUMO	20
1. INTRODUÇÃO	21
2. MATERIAL E MÉTODOS	22
2.1. Torrefação dos cavacos	22
2.2. Propriedades dos cavacos	24
2.3. Delineamento Experimental	25
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4. CONCLUSÕES	33
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

CAPÍTULO 3 – POTENCIAL ENERGÉTICO DE CAVACOS DE EUCALIPTO TORRIFICADOS EM REATOR DE FLUXO SEMI-CONTÍNUO	36
RESUMO	36
1. INTRODUÇÃO.....	36
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	38
2.1. Torrefação dos Cavacos	38
2.2. Propriedades dos Cavacos	39
2.3. Delineamento Experimental	40
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4. CONCLUSÕES	51
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES GERAIS	54

RESUMO

SILVA, Carlos Miguel Simões da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Torrefação de cavacos de eucalipto em reator de fluxo semi-contínuo.** Orientador: Benedito Rocha Vital. Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a torrefação de biomassa para fins energéticos. A biomassa utilizada foi madeira de eucalipto na condição de cavacos e as torrefações foram realizadas em um reator desenvolvido para tratamento térmico em fluxo semi-contínuo por rosca sem fim e aquecimento indireto. O estudo foi dividido em três capítulos, sendo: (1) “Avaliação de um reator desenvolvido para torrefação de biomassa em fluxo semi-contínuo”; (2) “Estudo dos principais parâmetros para o tratamento térmico de cavacos de madeira” e (3) “Potencial energético de cavacos de eucalipto torreficados em reator de fluxo semi-contínuo”. No primeiro capítulo verificou-se que o aumento da temperatura final dos tratamentos acarretou em um maior consumo de combustível por hora de funcionamento do reator, enquanto o aumento do tempo de residência ocasionou uma redução desse consumo. Os aumentos no tempo e na temperatura promoveram reduções na produtividade e nos rendimentos e balanços de massa e de energia dos tratamentos térmicos. No segundo capítulo observou-se uma redução nos teores de polissacarídeos e um conseqüente aumento nos teores de ligninas em função do aumento da temperatura e do tempo de torrefação e da redução da umidade inicial dos cavacos. A resistência à degradação térmica dos cavacos aumentou com a torrefação, enquanto a durabilidade mecânica foi reduzida com a conseqüente maior geração de finos. No terceiro capítulo observou-se que o aumento da temperatura e do tempo de torrefação influenciaram diretamente na redução dos valores de materiais voláteis, oxigênio elementar, umidade de equilíbrio e tamanho médio dos cavacos, além de maiores valores de carbono e poder calorífico. As densidades a granel e energética tenderam a um aumento inicial com posterior estabilização e redução nas condições mais severas de tratamento. De modo geral, conclui-se que reator utilizado para torrefação em fluxo semi-contínuo é tecnicamente viável. A temperatura final, o tempo de residência e a umidade inicial dos cavacos têm efeitos significativos na torrefação. Os cavacos torreficados de eucalipto apresentam maior potencial energético com relação a sua matéria-prima *in natura*.

ABSTRACT

SILVA, Carlos Miguel Simões da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016. **Torrefaction of eucalyptus wood chips in semi-continuous flow reactor.** Adviser: Benedito Rocha Vital. Co-adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

The aim of this study was to evaluate the torrefaction of biomass for energy purposes. The used biomass was chips of eucalyptus wood and the torrefaction process was realized in a reactor designed for thermal treatment in semi-continuous flow by worm screw and indirect heating. The study was divided into three chapters, being: (1) "Evaluation of a reactor developed for torrefaction of biomass into semi-continuous flow"; (2) "Study of the main parameters for the thermal treatment of wood chips" and (3) "Energy potential of eucalyptus chips torrefied in a semi-continuous flow reactor". In the first chapter it was found that increasing the final temperature of the treatments resulted in increased fuel consumption per hour of operation of the reactor, while increasing the residence time caused a reduction of consumption. The increase in time and temperature promoted reductions in productivity and yields and balances of energy and mass of thermal treatment. In the second chapter there was a reduction in the polysaccharides content and a consequent increase in the lignin content as a function of increasing of temperature and time torrefaction and of reducing the initial moisture of the chips. Resistance to thermal degradation of the wood chips increased with torrefaction, while mechanical durability was reduced with consequent bigger generation of fines. In the third chapter it was observed that increasing temperature and time torrefaction influenced directly in reducing of volatiles, elemental oxygen, equilibrium moisture and average size of wood chip, in addition to higher carbon and calorific values. Bulk and energy densities tended to an initial increase with subsequent stabilization and reduction in the most severe conditions of treatment. In general, it is concluded that reactor used for torrefaction in a semi-continuous flow is technically feasible. The final temperature, residence time and initial moisture of the chips have a significant effect on torrefaction. Torrefied eucalyptus chips have greater energy potential than raw material.

INTRODUÇÃO GERAL

O ser humano depende das fontes energéticas para suprir as suas necessidades básicas e atender a qualidade de vida desejada. O consumo de energia existe nas mais diversas atividades humanas, desde as primordiais como produção e preparo de alimentos e aquecimento doméstico até as atividades industriais e de alto avanço tecnológico. O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico de qualquer sociedade inevitavelmente resultam no aumento do consumo geral de energia. Essa demanda crescente, portanto, deve ser pauta de grande relevância no planejamento de qualquer governo.

Diversos critérios devem ser considerados na escolha das fontes energéticas que irão compor a matriz energética em questão, dentre os quais podem ser agrupados em: (I) Custo – A obtenção ou produção da energia deve ser viável às condições econômicas da população; (II) Disponibilidade – A diversificação dos tipos e a preferência por fontes de obtenção local devem ser adotadas para a maior segurança e independência de mercado; (III) Qualidade – As propriedades das fontes energéticas devem atender os índices necessários para ser utilizado nos equipamentos disponíveis; (IV) Questões socioambientais – O potencial impactante não deve ultrapassar os limites aceitáveis.

Partindo deste pressuposto, nota-se que a maioria dos países não possui matrizes energéticas que atendam a todos esses critérios, uma vez que são compostas majoritariamente por fontes combustíveis de origem fóssil. Esse cenário desfavorável faz aumentar o interesse em pesquisas e investimentos na obtenção e desenvolvimento de fontes alternativas de energia. O interesse se volta para fontes renováveis que possam ser obtidas localmente. Dentre as principais alternativas existentes estão as energias hidráulica, solar, eólica e aquelas provenientes do processamento das diversas biomassas agrícolas e florestais disponíveis.

A biomassa outrora já foi o principal combustível consumido pelo ser humano em virtude, principalmente, do tradicional uso da madeira na condição de “lenha”. Todavia, essa fonte energética perdeu representatividade em decorrência do início da exploração e consumo dos combustíveis de origem fóssil que, indiscutivelmente, apresentam qualidade energética superior. Quando comparada a esses combustíveis, a biomassa *in natura* apresenta índices indesejáveis nas principais propriedades de interesse energético, como altos valores de umidade,

higroscopicidade e heterogeneidade, além de baixos valores de densidade a granel, relação carbono/oxigênio e poder calorífico.

Para contornar essa situação, existe um atual processo de modernização da biomassa, buscando torná-la um combustível de maior qualidade, mais competitivo e atrativo dentro do mercado de energia. Nesse processo incluem-se o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de combustão, de rotas de conversão térmica, química e biológica e de pré-tratamentos, tais como a torrefação, objeto de estudo dessa dissertação. A torrefação é classificada como um pré-tratamento térmico, intermediário entre a secagem e a carbonização, que apresenta resultados satisfatórios de acordo com diversos pesquisadores trabalhando com diferentes biomassas agrícolas e florestais.

Dentre as principais vantagens citadas da torrefação estão o incremento nos teores de carbono e energia, a redução da umidade de equilíbrio higroscópico e o aumento da moabilidade e da homogeneidade da biomassa. Além disso, é um tratamento de alto rendimento e produtividade com relação à tradicional carbonização. Todavia, a torrefação em escala comercial ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento, necessitando de estudos tanto na área tecnológica de reatores de torrefação quanto na elucidação das principais variáveis de processo, sendo necessárias pesquisas que busquem otimizar os parâmetros do processo de torrefação para torná-lo mais atrativo dentro do mercado de energia.

Nesse contexto, o presente estudo visa propor a torrefação como alternativa para o incremento do potencial energético de cavacos de madeira de eucalipto, uma das principais biomassas florestais disponíveis no Brasil. O estudo foi estruturado em três capítulos, sendo que no primeiro foram avaliados o potencial e a viabilidade técnica de um reator desenvolvido para torrefação de biomassa em fluxo semi-contínuo. No segundo capítulo foi realizado um estudo das principais variáveis no tratamento térmico de cavacos de madeira. E, finalmente, no terceiro capítulo foi avaliado o potencial energético de cavacos de eucalipto submetidos a diferentes níveis de torrefação.

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DE UM REATOR DESENVOLVIDO PARA TORREFAÇÃO DE BIOMASSA EM FLUXO SEMI-CONTÍNUO

Resumo: A torrefação de biomassa em escala comercial para fins energéticos ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento, necessitando de estudos tanto na área tecnológica de reatores de torrefação quanto na elucidação das principais variáveis de processo. Neste contexto, o objetivo deste capítulo foi avaliar a viabilidade técnica de um reator para torrefação de biomassa. O reator avaliado foi desenvolvido para o tratamento térmico em fluxo semi-contínuo por rosca-sem-fim com aquecimento indireto e reaproveitamento dos materiais voláteis. A biomassa – cavacos de eucalipto – foi submetida a dois experimentos no reator, avaliando independentemente os efeitos da temperatura e do tempo de torrefação. Foram avaliados perfis térmicos, consumos de combustível, rendimentos e balanços de massa e energia do reator, além do potencial energético dos cavacos torreficados. Verificou-se que o aumento da temperatura acarretou em um maior consumo por hora de combustível para se manter a temperatura desejada no reator. O aumento do tempo, por sua vez, ocasionou uma redução desse consumo, todavia com a redução também acentuada na produtividade. Os aumentos no tempo e na temperatura promoveram a redução nos rendimentos e balanços de massa e de energia, sendo que valores de energia foram superiores aos respectivos valores de massa. Quanto aos cavacos torreficados, o aumento tanto do tempo quanto da temperatura promoveu um considerável incremento na sua qualidade energética, reduzindo a umidade de equilíbrio e aumentando os teores de carbono e energia. Conclui-se que o protótipo do reator de torrefação em fluxo semi-contínuo apresentou-se tecnicamente viável para o tratamento térmico de cavacos de madeira para fins energéticos.

Palavras-chave: Rosca-sem-fim, Balanço de Energia e Qualidade Energética.

1. INTRODUÇÃO

A torrefação é um tratamento térmico que surgiu como alternativa para elevar a competitividade da madeira e das demais biomassas dentro do mercado de energia (VAN DER STELT et al., 2011). Esse tratamento converte a biomassa em um combustível com melhores características de manuseio, transporte, armazenamento e utilização final nos sistemas de queima ou de conversão energética similar. Dentre as

principais características citadas da biomassa torrificada estão os maiores valores de carbono e energia, homogeneidade, moabilidade, resistência à degradação biológica e os menores valores de umidade e higroscopicidade com relação à matéria-prima *in natura*, (ESTEVEES e PEREIRA, 2009; VAN DER STELT et al., 2011; MEDIC et al., 2012; DU et al., 2014).

A torrefação da biomassa consiste em submetê-la a um aquecimento controlado em condições de baixa disponibilidade de oxigênio (VAN DER STELT et al., 2011). O tratamento é aplicado normalmente entre 200 e 300°C, sendo o efeito da temperatura dependente das demais variáveis, como tempo de aquecimento, composição química e umidade inicial da biomassa utilizada (ESTEVEES e PEREIRA, 2009; ALMEIDA et al., 2010). O meio de aquecimento é outra importante variável que pode influenciar nesse tratamento, uma vez que a aplicação uniforme de calor, a movimentação adequada da biomassa e a translocação eficiente dos gases são parâmetros que podem reduzir o tempo e a temperatura de tratamento.

A torrefação em escala comercial ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento, estando associada à produção de pellets e a cogeração de energia e restrita a alguns países da Europa, Estados Unidos e Canadá (KOPPEJAN et al., 2012; WILÉN et al., 2014). As tecnologias de torrefação existentes são compostas por uma ampla diversidade de meios de aquecimento, na maioria adaptações de sistemas de secagem, incluindo-se reatores do tipo tambor rotativo, parafuso rosca-sem-fim, forno de soleiras múltiplas, micro-ondas, secador em esteira, leito fixo e leito móvel (KOPPEJAN et al., 2012).

Nesse contexto, o objetivo do presente estudo foi avaliar a viabilidade técnica de um reator desenvolvido para torrefação de biomassa em fluxo semi-contínuo por rosca-sem-fim. Os objetivos específicos foram avaliar o perfil térmico do reator, os rendimentos e os balanços de massa e energia e a qualidade energética de cavacos de eucalipto torreficados em função da temperatura final e do tempo de residência do tratamento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foi utilizado um reator de torrefação projetado e construído em estrutura principal de aço carbono, consistindo de cinco sistemas principais (Figura 1) – o transporte dos cavacos; o aquecimento indireto; o resfriamento indireto; e o sistema de queima para a produção do gás de aquecimento.

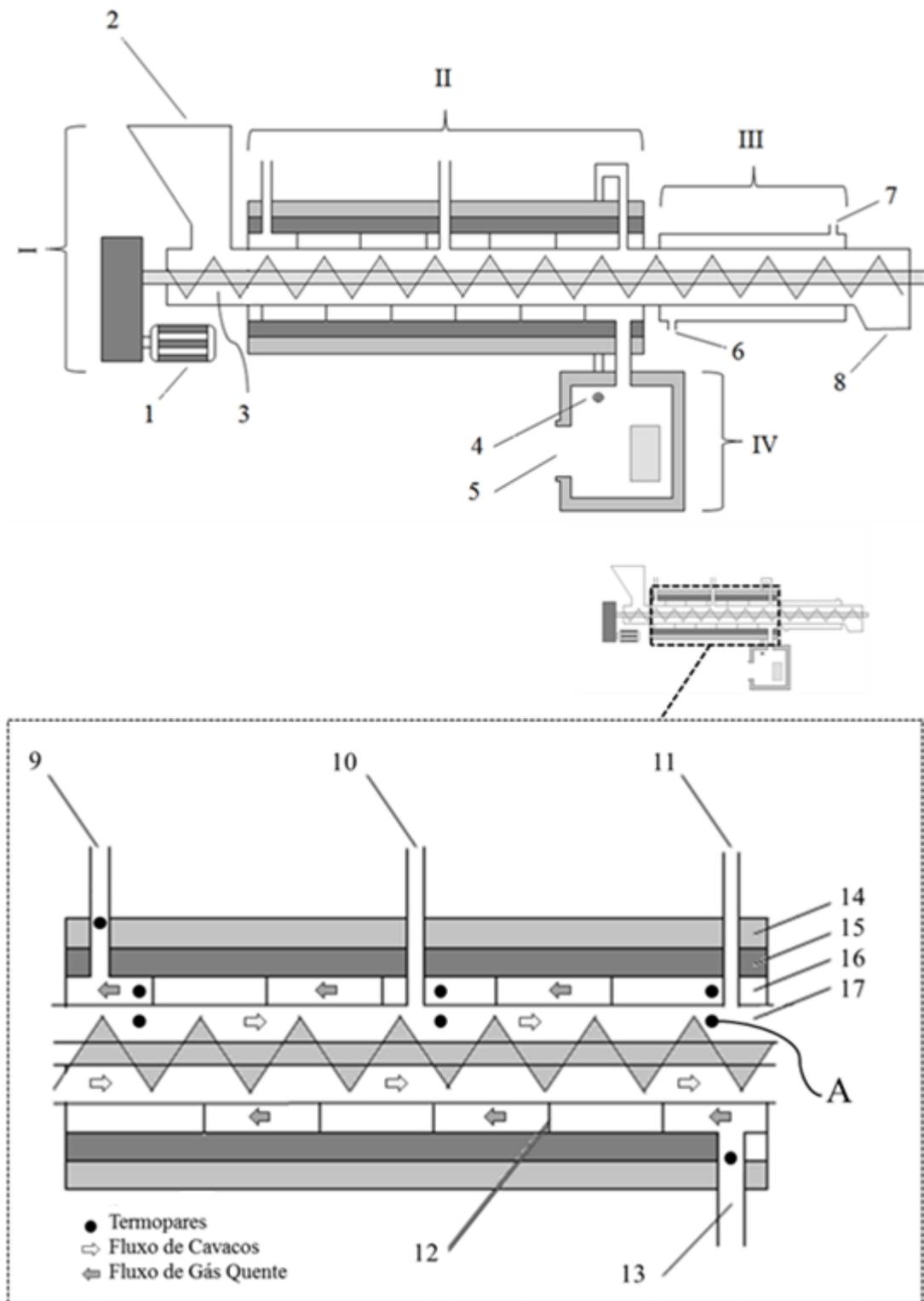


Figura 1. Layout em vista lateral do reator para torrefação de biomassa (cavacos de madeira) em fluxo semi-contínuo, com destaque para o sistema de aquecimento. Sendo: I – Sistema de Transporte; II - Sistema de Aquecimento; III - Sistema de Resfriamento; IV – Sistema de Queima; 1 – Motor; 2 – Silo/entrada de cavacos; 3 – Rosca-sem-fim; 4 – Conexão da segunda “chaminé” com o sistema de Queima; 5 – Conexão do queimador na câmara quebra-chamas; 6 – Entrada de água; 7 – Saída de água; 8 – Saída dos cavacos torreficados; 9 – Exaustor Elétrico/Saída do gás de aquecimento; 10 – Primeira “chaminé”; 11 – Segunda “chaminé” conectada ao sistema de queima; 12 – Aletas; 13 – Entrada do gás de aquecimento; 14 – Camada isolante; 15 – Camada refratária; 16 – Fluxo do gás de aquecimento; 17 – Fluxo dos cavacos; A – Local de coleta da temperatura final do tratamento.

O sistema de transporte (Figura 1. I) consiste de um parafuso do tipo rosca sem fim, de 2,3 metros de comprimento e 13 centímetros de diâmetro, acionado por um motor elétrico com rotação reduzida para 10 RPM, que conduz os cavacos por uma tubulação metálica do silo de alimentação até a saída do reator. Os cavacos percorrem dois estágios dentro da tubulação, sendo o primeiro do sistema de aquecimento e o segundo do sistema de resfriamento.

O tempo de residência dos cavacos no estágio de aquecimento foi controlado por dois relés temporizadores analógicos que desligam e acionam o motor em tempos equidistantes após cada rotação completa da rosca-sem-fim. O sistema de transporte foi classificado como semi-contínuo devido ao acionamento alternado da rosca-sem-fim, o que permitiu que mesmo com a estrutura compacta do reator, fosse possível obter tempos elevados de residência no processo. O tempo de residência foi estimado seguindo a seguinte fórmula:

$$\text{Tempo de Residência} = NV \times (Tp + Tm)$$

Sendo:

NV: Números de voltas necessárias da rosca-sem-fim para transportar os cavacos por todo o estágio de aquecimento do reator;

Tp: Tempo médio de cada parada da rosca-sem-fim;

Tm: Tempo médio de movimento de cada rotação da rosca-sem-fim;

O sistema de aquecimento (Figura 1. II) consiste de um invólucro externo (“camisa”) em torno de parte do sistema de transporte. Dentro dele há o fluxo do gás quente que aquece indiretamente os cavacos por meio da troca de calor com a tubulação metálica e tem sua saída forçada por um exaustor elétrico instalado na extremidade oposta a sua entrada no reator. A parede do invólucro é revestida internamente com uma camada de material refratário (concreto) e externamente com uma camada de material isolante (manta cerâmica). Além disso, há uma série de aletas dispostas dentro dele funcionando como barreiras para reduzir a velocidade do gás de aquecimento, ampliar a área de contato e aumentar a eficiência na troca de calor com a tubulação.

A exaustão dos gases gerados pela secagem e degradação térmica dos cavacos acontece por duas saídas localizadas acima do estágio de aquecimento, sendo expelidos de forma natural através do efeito “chaminé”. Os gases da segunda saída podem ser redirecionados ao sistema de queima para serem utilizados como

combustível extra, uma vez que são gerados na fase final do tratamento térmico e, portanto, apresentam maiores teores de compostos voláteis com poder calorífico significativo. Isso reduz os gastos energéticos do equipamento e reduz o seu potencial impactante ao evitar a liberação desses gases poluidores ao ambiente.

Foram instalados oito pontos de coleta de temperatura com termopares do tipo “J” ao longo do reator para obtenção do perfil térmico do sistema. A temperatura de cada tratamento foi considerada a média registrada pelo termopar inserido no estágio final de aquecimento dos cavacos, indicada pela letra A na Figura 1, onde se alcança os valores máximos de temperatura dentro da tubulação do sistema de transporte. Salienta-se que como o transporte dos cavacos dentro do reator é em contracorrente ao fluxo do gás de aquecimento, o acréscimo de temperatura dentro do mesmo ocorreu concomitantemente ao deslocamento dos cavacos.

O sistema de resfriamento (Figura 1. III) consiste de um segundo invólucro externo (“camisa”) por onde há a circulação forçada de água e o resfriamento dos cavacos ocorre de forma indireta pela troca de calor com a tubulação. A água utilizada no resfriamento foi armazenada em um tanque reservatório, sendo reaproveitada por meio de circuito fechado com o uso de uma minibomba submersa.

O sistema de queima (Figura 1. IV) é constituído por uma câmara de conexão quebra-chamas entre o queimador, que fornece a energia térmica, e o reator, que utiliza essa energia durante o processo. A câmara é revestida internamente com material isolante, disposta embaixo do reator e conectada à extremidade final do estágio de aquecimento. O queimador utilizado pode ser qualquer tipo de equipamentos devidamente projetado para fornecer o gás de aquecimento, podendo utilizar combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos (ex.: cavaco e pellets). Além da abertura para o acoplamento do queimador, existe uma segunda abertura na câmara para o controle de temperatura do gás de aquecimento e limpeza do compartimento.

2.1.Avaliação Experimental do Reator

Para avaliação de desempenho do reator, utilizou-se cavacos de eucalipto doados pela empresa BioFogo, situada no município de Ressaquinha/MG, com tamanho inferior a 12 mm e umidade de aproximadamente 15%, base seca. O volume de cavacos submetido a cada tratamento foi estabelecido com base nas respectivas quantidades necessárias para atender o mínimo de 120 minutos previamente estabelecidos de produção efetiva para cada um.

Nesse estudo foi utilizado o gás liquefeito de petróleo - GLP (“Gás de cozinha”) no sistema de queima para produção do gás de aquecimento, devido à facilidade de controle do consumo para os cálculos posteriores. Cabe salientar, que os tratamentos foram iniciados apenas quando as temperaturas de todos os termopares se estabilizavam. As massas iniciais e finais do cilindro de GLP em cada tratamento, assim como o tempo gasto, foram determinadas para se obter o consumo de combustível e os balanços de massa e energia.

Os rendimentos e balanços de massa e de energia foram obtidos conforme as equações a seguir.

$$Eq.01: \quad \text{Rendimento Massa (\%)} = \frac{M.S.F. \times 100}{M.S.I.}$$

$$Eq.02: \quad \text{Rendimento Energia (\%)} = \frac{\text{Rendimento em Massa} \times PCS_{Final}}{PCS_{Inicial}}$$

$$Eq.03: \quad \text{Balanço de Massa} = \frac{M.S.F.}{M.S.I. + M.E. \text{ Madeira-GLP}}$$

$$Eq.04: \quad \text{Balanço de Energia} = \frac{M.S.F. \times PCS_{Final}}{M.S.I. \times PCS_{Inicial} + Massa_{GPL} \times PCS_{GPL}}$$

Sendo:

M.S.I.: Massa Seca Inicial de cavacos utilizada, em kg;

M.S.F.: Massa Seca Final de cavacos torreficados, em kg;

PCS_{Inicial}: Poder Calorífico Superior dos cavacos utilizados, em MJ/kg;

PCS_{Final}: Poder Calorífico Superior dos cavacos torreficados, em MJ/kg;

M.E. Madeira-GLP: Massa Equivalente de Madeira-GLP;

GPL: Gás Liquefeito de Petróleo – “Gás de cozinha”;

O rendimento em massa foi calculado com base na massa seca de cavacos utilizada, ou seja, descontando-se a umidade inicial. Para o cálculo do balanço de massa foi utilizado um valor teórico da massa equivalente madeira-GLP, onde a massa de GLP gasta pelo sistema de queima foi convertida em massa de madeira. O Poder Calorífico do GLP era de 47,34 MJ/kg, segundo dados do fornecedor. O Poder Calorífico Útil (PCU) da madeira foi estimado em 15,92 MJ/kg de acordo com o Poder Calorífico Superior (PCS) e a umidade dos cavacos utilizados *in natura*.

Para avaliar a qualidade energética dos cavacos torreficados, amostras foram colocadas na câmara climática a $\pm 20^{\circ}\text{C}$ e $\pm 65\%$ de umidade relativa até atingir massa constante para a determinação da Umidade de Equilíbrio Higroscópico, seguindo as normas da DIN EN 14774-1 (2010). A Análise Química Imediata foi

realizada de acordo com as normas da ABNT NBR 8112 (1983) para determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. O Poder Calorífico Superior foi obtido de acordo com a norma da DIN EN 14918 (2010), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

2.2. Delineamento experimental

A temperatura final e o tempo de aquecimento são as principais variáveis de processo que podem influenciar na torrefação. Por isso foram instalados dois experimentos segundo delineamento inteiramente casualizado, independentes, avaliando as variáveis citadas, a saber:

I) Efeito “Temperatura”: O experimento foi instalado com três temperaturas finais (220, 260 e 300°C) de torrefação no tempo fixo de 15 minutos, além da testemunha de cavacos *in natura*.

II) Efeito “Tempo”: O experimento foi instalado com três tempos de aquecimento (10, 15 e 20 minutos) de torrefação na temperatura máxima de 300°C, além da testemunha de cavacos *in natura*.

Os dados de qualidade dos cavacos torreficados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de Tukey e com a testemunha pelo teste Dunnett, ambos a 5% de significância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 é apresentado o perfil térmico do reator durante a torrefação de cavacos por 15 minutos nas três temperaturas finais de 220, 260 e 300°C. Os valores médios de temperatura foram convertidos em uma escala condicionada de três cores. As tonalidades puras do azul e do vermelho foram atribuídas, respectivamente, ao valor mínimo e ao valor máximo de temperatura, e a tonalidade pura do amarelo atribuída ao valor intermediário.

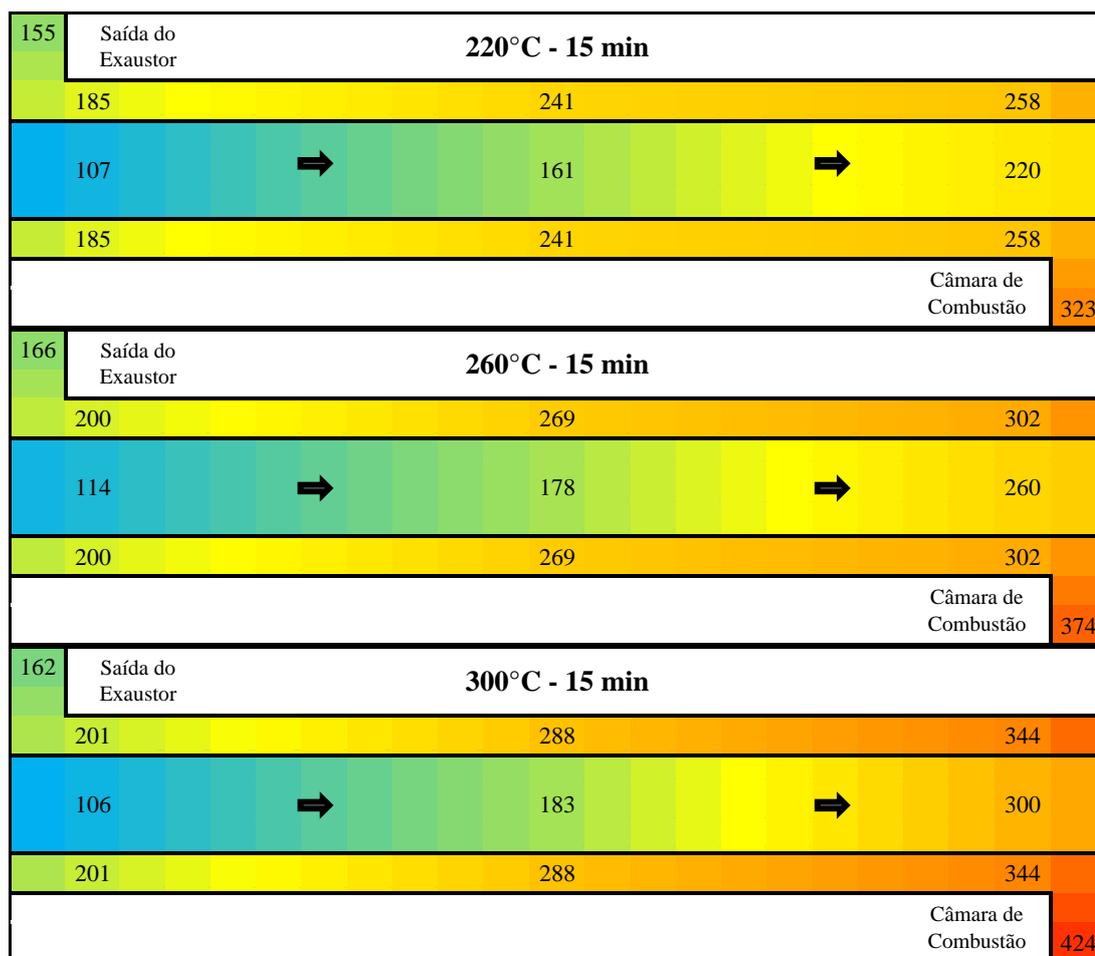


Figura 2. Perfil térmico do sistema de aquecimento do reator durante a torrefação de cavacos de madeira em diferentes temperaturas finais e com o tempo de residência de 15 minutos. As setas indicam o fluxo de transporte dos cavacos.

Observa-se na Figura 2 uma relação direta entre a temperatura de entrada do gás de aquecimento no reator e a temperatura final de torrefação de cada tratamento. A temperatura média de 323°C na entrada do gás foi suficiente para fornecer a energia térmica necessária à tubulação metálica para torrificar os cavacos até a temperatura de 220°C. Incrementos graduais de $\pm 50^\circ\text{C}$ na temperatura deste gás foram suficientes para atingir as demais temperaturas de torrefação, tendo alcançado as temperaturas de 373 e 423°C, respectivamente para os tratamentos realizados até 260 e 300°C.

A diferença de temperatura entre as regiões externa e interna da tubulação metálica no estágio de aquecimento foi menor próximo à entrada do gás de aquecimento do reator. Essa diferença ocorreu porque a entrada do gás no sentido perpendicular promove um contato mais direto e prolongado deste com a tubulação, tendo, portanto uma maior transferência de calor para o reator. Posteriormente, ao ser succionado pelo exaustor, instalado na extremidade oposta, o gás de aquecimento

percorre um trajeto em paralelo à tubulação, fazendo com que a troca de calor seja menos eficiente. Além disso, a própria perda térmica do gás de aquecimento ao longo da tubulação pode ter influenciado na redução gradual da eficiência na troca de calor.

Observa-se que a maior troca de calor entre o gás de aquecimento e a tubulação metálica ocorreu em temperaturas mais elevadas. A diferença de temperatura entre a entrada (câmara de combustão) e a saída (exaustor) do gás no estágio de aquecimento foi de 262°C para o tratamento com temperatura final de 300°C, enquanto para os tratamentos a 260 e 220°C as diferenças foram, respectivamente, de 207 e 168°C.

A temperatura do gás de aquecimento na saída do exaustor ficou acima de 155°C, independente do tratamento. Essa perda de energia térmica é indesejável, sugerindo que o protótipo poderia ser construído em maiores dimensões, com melhor isolamento térmico e com maior número de aletas para elevar a eficiência térmica do reator de torrefação.

Na Figura 3 é apresentado o perfil térmico do sistema de aquecimento do reator durante a torrefação de cavacos a 300°C e tempos de residência de 10, 15 e 20 minutos. Nota-se que quanto maior o tempo de torrefação, ou seja, quanto mais lento o transporte dos cavacos pela rosca-sem-fim, menor foi a temperatura demandada pelo gás de aquecimento para manter o reator na temperatura de 300°C. O aumento do tempo de torrefação de 10 para 20 minutos permitiu uma redução de 64°C na temperatura média de entrada do gás no estágio de aquecimento.

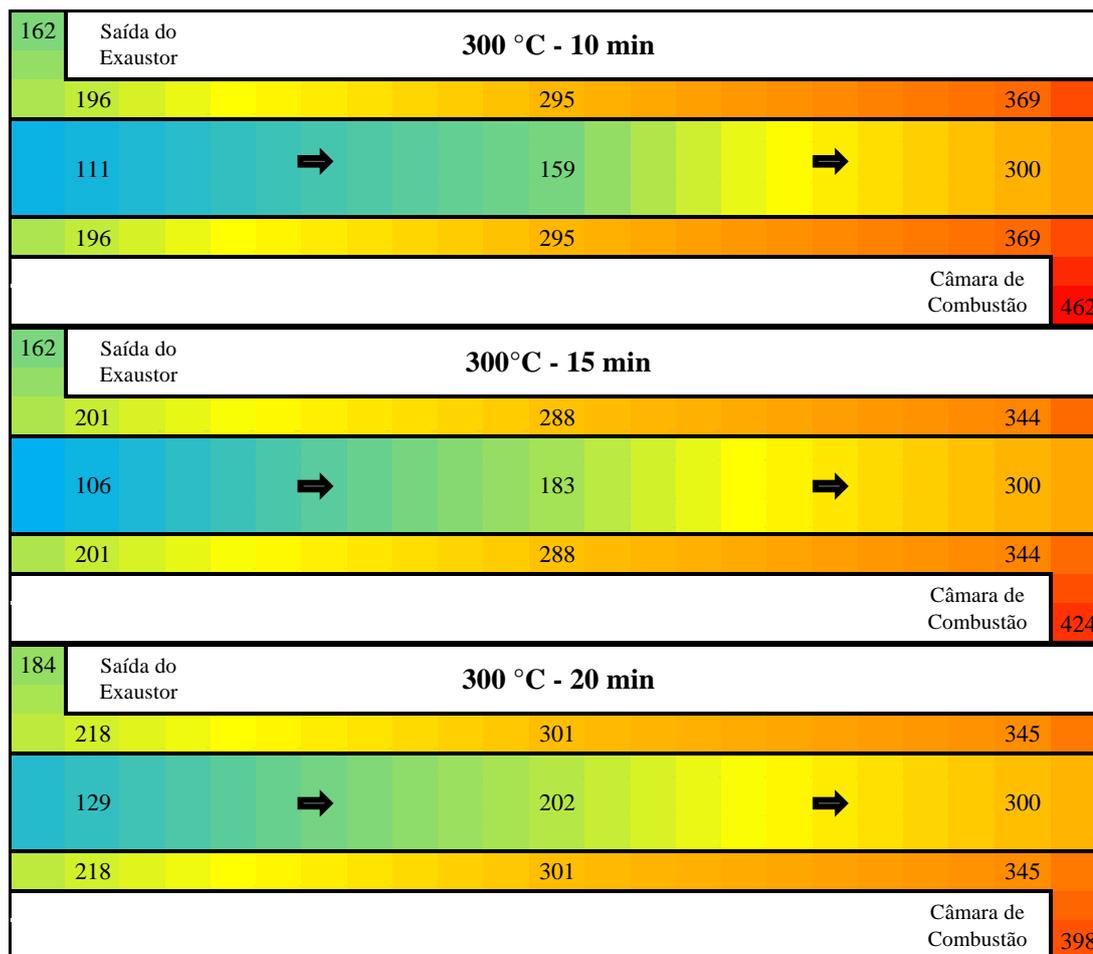


Figura 3. Perfil térmico do sistema de aquecimento do reator durante a torrefação de cavacos de madeira em função do tempo de residência de torrefação com a temperatura de 300°C. As setas indicam o fluxo de transporte dos cavacos.

O perfil térmico do reator dos cavacos torreficados por 10 minutos evidenciou uma maior perda térmica do gás de aquecimento (Figura 3). As tonalidades mais destacadas de vermelho e azul deste tratamento evidenciam a variação de temperatura mais brusca ao longo do equipamento, chegando a apresentar os menores valores na região mediana do reator comparados com os outros dois tratamentos.

Existem três possíveis explicações para a maior temperatura de entrada do gás de aquecimento e a maior variação térmica ao longo do sistema observada para o tratamento mais rápido de 10 minutos: (I) O tempo de secagem não foi suficiente para eliminar toda a massa de água dos cavacos na primeira “chaminé”, fazendo com que a água eliminada na segunda consumisse parte da energia térmica disponível; (II) O maior fluxo de cavacos dentro do reator demandou um maior consumo energético para atender a mesma transferência de calor por unidade de massa de cavacos,

conforme discutido por Park et al. (2010); (III) O tempo de exposição à fonte de calor não foi suficiente para iniciar algumas das reações exotérmicas decorrentes da degradação térmica da madeira, o que poderia fornecer parte da energia térmica necessária para manter o equilíbrio de temperatura no tratamento, conforme discutido por Park et al. (2010).

Na Figura 4 são apresentados o consumo de combustível (GLP) e a produtividade de cavacos torreficados do reator de torrefação em função da temperatura final e do tempo de residência, por tratamento.

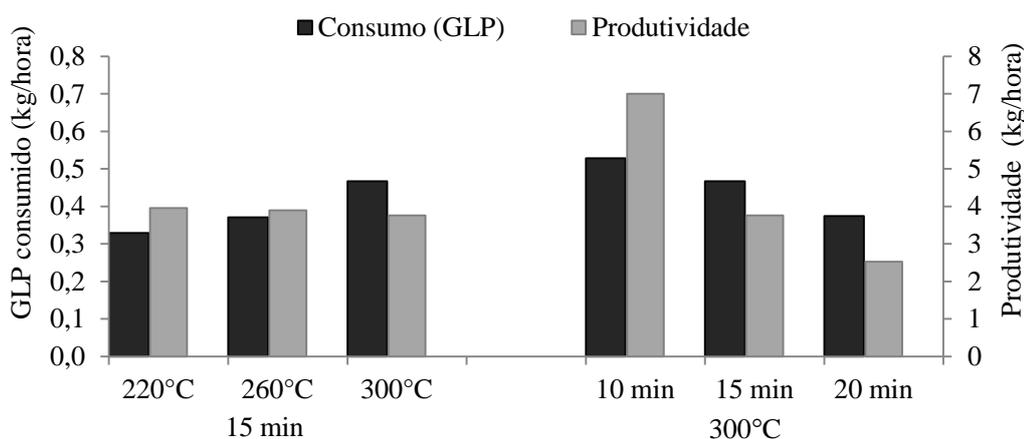


Figura 4 – Consumo de combustível e produtividade do reator de torrefação em função da temperatura com tempo de residência de 15 minutos e em função do tempo com a temperatura final de 300°C.

Observa-se que o aumento da temperatura de torrefação resultou em um maior consumo por hora de combustível (GLP) na câmara de combustão, enquanto o aumento do tempo de aquecimento reduziu esse consumo. Essas tendências apresentaram-se proporcionais as variações de temperaturas do gás de aquecimento na entrada do reator, conforme as discussões dos perfis térmicos referentes às Figuras 2 e 3.

O aumento da temperatura iniciou o decréscimo na produtividade de cavacos torreficados devido à perda de massa decorrente da degradação térmica ocorrida durante o processo. Ressalta-se que a perda de massa é o fator que melhor explica essa redução, visto que a quantidade de cavacos conduzida pelo sistema de transporte permaneceu constante. O aumento do tempo, por sua vez, propiciou reduções acentuadas da produtividade porque, além das perdas de massa, o sistema de transporte passou a conduzir menores quantidades de cavacos por hora em decorrência dos maiores tempos de parada da rosca sem fim.

A produtividade do equipamento é um dos fatores mais relevantes para atender a produção em escala industrial. O reator de torrefação utilizado é um protótipo em escala laboratorial que deve ter o projeto redimensionado para que possa suprir a demanda desejada pela indústria. Ressalva-se que o aumento do comprimento do sistema de aquecimento permitirá trabalhar com os mesmos tempos de residência, mas com um fluxo maior de cavacos dentro do mesmo. Além disso, esse aumento promoveria um melhor aproveitamento da energia térmica fornecida ao sistema, conforme mencionado nas discussões das Figuras 2 e 3.

Na Figura 5 são apresentados os rendimentos e balanços de massa e energia dos tratamentos em função da temperatura final de torrefação e em função do tempo de aquecimento.

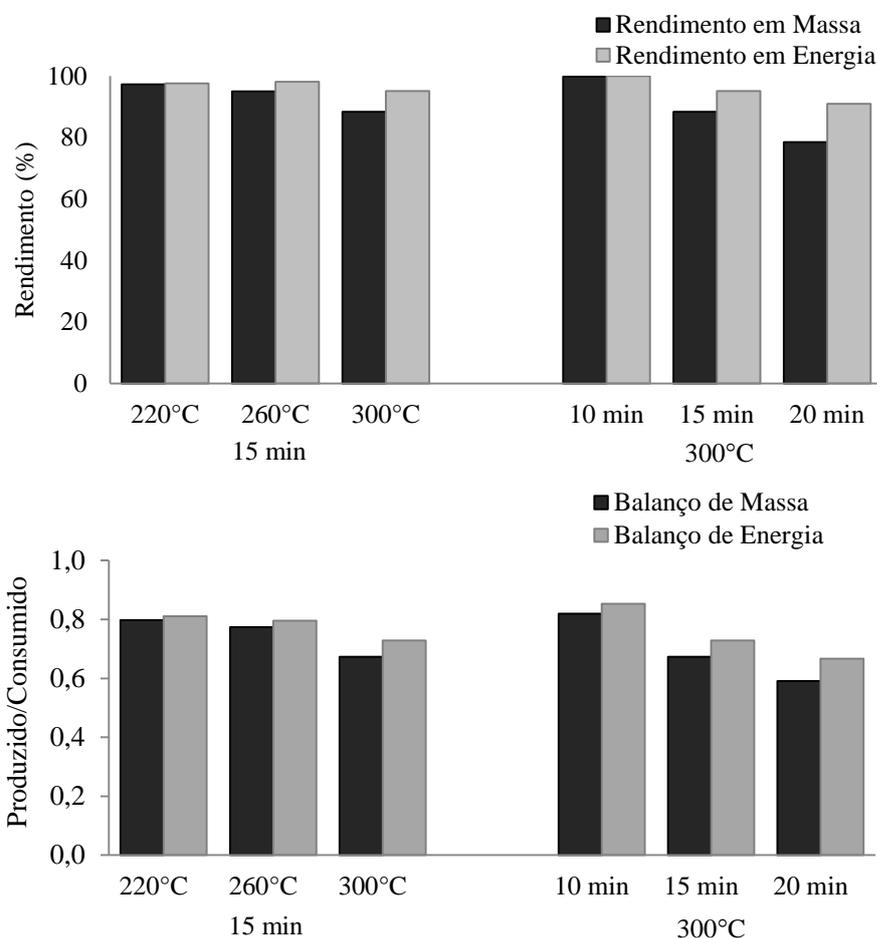


Figura 5 – Rendimentos e Balanços de massa e energia do reator de torrefação em fluxo semi-contínuo em função da temperatura e do tempo de tratamento.

Observa-se que os aumentos da temperatura final e do tempo de aquecimento do processo de torrefação resultaram em reduções nos rendimentos tanto de massa quanto de energia, devido à maior degradação térmica dos cavacos. Nota-se que os

rendimentos em massa foram superiores aos seus respectivos rendimentos em energia. De maneira geral, os rendimentos observados estiveram de acordo com a literatura que cita valores típicos para a torrefação superiores a 70% para o rendimento em massa e 90% para o rendimento em energia (VAN DER STELT et al., 2011; AGAR e WIHERSAARI, 2012).

O maior rendimento em energia da torrefação comparado ao respectivo rendimento em massa é decorrente da degradação térmica seletiva dos constituintes menos estáveis termicamente da madeira, em especial das hemiceluloses (VAN DER STELT et al., 2011; AGAR e WIHERSAARI, 2012). As hemiceluloses perfazem menos de 1/3 da massa seca da madeira, explicando os altos rendimentos em massa do processo, geralmente superiores a 70%. Além disso, são polissacarídeos amorfos e de baixo grau de polimerização, o que resulta em baixos valores energéticos com relação aos demais constituintes (HAYKIRI-ACMA et al., 2010; PEREIRA et al., 2013). Deste modo, as combinações de tempo e temperatura normalmente empregadas na torrefação promovem a degradação apenas da fração menos energética da madeira, o que resulta nos rendimentos em energia superiores aos rendimentos em massa.

Observa-se que o aumento tanto da temperatura final quanto do tempo de aquecimento promoveu reduções nos balanços de massa e de energia do processo de torrefação. Verificou-se que, similarmente as tendências de rendimento, os balanços de energia foram superiores aos respectivos balanços de massa. Isso devido às perdas decorrentes da degradação térmica dos cavacos e também devido as maiores consumos de combustível na câmara de combustão por unidade de massa torrificada de cavacos.

Ressalva-se que a quantidade de cavacos torrificados está associada à intensidade do tratamento e a qualidade desejada do produto, assim, a redução nos gastos com combustível torna-se a principal via para se ter balanços de massa e energia mais elevados. Para isso, faz-se necessário aumentar a eficiência de queima na câmara de combustão e de troca térmica dentro do reator.

Na Tabela 1 são apresentados os principais índices associados à qualidade energética dos cavacos de eucalipto torrificados avaliando-se o efeito da temperatura máxima e do tempo de aquecimento utilizados nos tratamentos.

Tabela 1 - Umidade de Equilíbrio Higroscópico (UEH), Materiais Voláteis (MV), Carbono Fixo (CF), Cinzas e Poder Calorífico Superior (PCS) de cavacos torreficados de eucalipto em função dos tratamentos

EFEITO	Variável	U.E.H (%)	M.V. (%)	C.F. (%)	Cinzas (%)	PCS (MJ/kg)
Testemunha	---	14,4	85,0	13,9	1,1	19,3
Temperatura	220°C	11,1 a*	84,7 a	14,2 c	1,1 a	19,3 c
	260°C	7,5 b*	82,3 b*	16,5 b*	1,2 a	19,9 b*
	300°C	6,6 c*	78,4 c*	20,3 a*	1,2 a	20,7 a*
Tempo	10 min	10,0 a*	83,7 a*	15,1 c*	1,2 b	19,5 c
	15 min	6,6 b*	78,4 b*	20,3 b*	1,2 b	20,7 b*
	20 min	6,4 b*	70,5 c*	27,7 a*	1,8 a*	22,3 c*

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si na coluna dentro de cada efeito pelo Teste Tukey a 5%. Médias seguidas de asterisco (*) diferem significativamente da testemunha a 5% pelo Teste Dunnett.

Observam-se na Tabela 1 que os aumentos tanto da temperatura máxima quanto do tempo de aquecimento promoveram decréscimos significativos na umidade de equilíbrio higroscópico e nos teores de materiais voláteis, além de promover um aumento nos teores de carbono fixo, cinzas e no poder calorífico superior dos cavacos torreficados.

A menor umidade alcançada nas condições de equilíbrio higroscópico se deve as mudanças ocorridas na composição química da madeira torreficada. A torrefação promove a degradação preferencial das hemiceluloses que são os constituintes estruturais com as maiores quantidades de grupos hidroxílicos disponíveis para a adsorção de moléculas de água (ACHARJEE et al., 2011). Além disso, pode ter havido o conseqüente aumento na concentração dos teores de ligninas, constituintes caracteristicamente mais hidrofóbicos da madeira.

A umidade da madeira tem correlação negativa com seu conteúdo energético devido à energia gasta para evaporar a água do material durante as reações da combustão (SWITHENBANK et al. 2011). Logo, a menor higroscopicidade dos cavacos torreficados é vantajosa do ponto de vista energético, já que eleva a sua eficiência de queima e aumenta o rendimento operacional de transporte e manuseio dos mesmos. A menor umidade também influi na menor susceptibilidade da madeira a degradação biológica, o que é essencial para manter a sua qualidade durante o armazenamento (KYMÄLÄINEN et al., 2014).

A fração degradada da madeira durante a torrefação é eliminada na forma materiais voláteis, concentrando, conseqüentemente, carbono fixo no produto final

(DU et al., 2014). Os materiais voláteis são advindos preferencialmente da degradação das hemiceluloses e de uma fração dos extrativos. Concentra-se na madeira torrificada, portanto, os componentes restantes que apresentam maiores teores de carbono: a celulose e, principalmente, as ligninas, além dos materiais inorgânicos que compõem as cinzas (VAN DER STELT et al., 2011; KOPPEJAN et al., 2012). Assim, o aumento tanto da temperatura quanto do tempo de torrefação promoveu a concentração dos teores de carbono fixo e cinzas em virtude da eliminação dos materiais voláteis, principalmente no tratamento a 300°C por 20 minutos.

As cinzas são os componentes inorgânicos inertes durante a combustão da madeira, não contribuindo energeticamente para o seu poder calorífico (KORUS e SZLEK, 2015). Além disso, existem alguns minerais da sua constituição que apresentam altos índices de abrasão e corrosão, desgastando os equipamentos de queima e aumentando os gastos com limpeza (PEREIRA et al., 2013). Contudo, os aumentos observados neste estudo para os teores de cinzas dos cavacos foram baixos e pouco significativos em comparação aos aumentos observados para os teores de carbono fixo e poder calorífico.

O aumento no nível de torrefação elevou o poder calorífico dos cavacos, o que está diretamente relacionado ao aumento dos teores de carbono fixo com relação aos teores de materiais voláteis (DU et al., 2014). A eliminação de materiais voláteis está associada à degradação de compostos orgânicos com altos teores de oxigênio, elemento este que reduz a quantidade de energia potencialmente liberável do combustível durante a queima. Em contrapartida, a concentração de carbono da madeira durante a torrefação tem influência positiva no incremento de poder calorífico. Conforme apresentado na Figura 5, o rendimento em energia na torrefação é maior que o respectivo rendimento em massa, havendo, portanto, uma concentração de energia por unidade de massa torrificada, ou seja, aumentando seu poder calorífico.

4. CONCLUSÕES

- O protótipo do reator de torrefação em fluxo semi-contínuo tem potencial e é tecnicamente viável para o tratamento térmico de cavacos de madeira em diferentes temperaturas máximas e tempos de residência.

- O aumento na temperatura de torrefação promove um aumento no consumo de combustível por hora e uma redução dos rendimentos e dos balanços de massa e energia.
- O aumento no tempo de residência da torrefação promove uma redução no consumo de combustível, na produtividade e nos rendimentos e balanços de massa e energia.
- Tanto o aumento da temperatura máxima quanto do tempo de residência da torrefação tem influência positiva nos índices relacionados à qualidade energéticas dos cavacos de eucalipto, tais como higroscopicidade reduzida, menor teor de materiais voláteis e maiores teores de carbono fixo e de poder calorífico.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 8112**: Carvão Vegetal – Análise Imediata. Rio de Janeiro. 1983.

ACHARJEE, T.C.; CORONELLA, C.J.; VASQUEZ, V.R. Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v.102, p.4849-4854, 2011.

AGAR, D.; WIHERSAARI, M. Bio-coal, torrefied lignocellulosic resources – Key properties for its use in co-firing with fossil coal – Their status. **Biomass and Bioenergy**, v.44, p.107-111, 2012.

ALMEIDA, G.; BRITO, J.O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology**, v.101, p.9778-9784, 2010.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG-**DIN EN 14774-1**: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method. Berlin: CEN, 2010. 10 p.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG-**EN 14918**: Determination of calorific value. Berlin: CEN, 2010. 63 p.

DU, S.; CHEN, W.; LUCAS, J.A. Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. **Bioresource Technology**, v.161, p-333-339, 2014.

ESTEVEZ, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, v.4(1), p.370-404. 2009.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S.; KUCUKBAYRAK, S. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v.91, p.759-764, 2010.

KOPPEJAN, J. et al. Status overview of torrefaction technologies. **IEA Bioenergy Task 32 – Final Report**. 54 p.2012.

KORUS, A.; SZLEK, A. The effect of biomass moisture content on the IGCC efficiency. **Biomass and Bioenergy**, v.80, p.222-228, 2015.

KYMÄLÄINEN, M. et al. Biological degradation of torrefied wood and charcoal. **Biomass and Bioenergy**, v.71, p.170-177, 2014.

MEDIC, D. et al. Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. **Fuel**, v.91, p.147-154, 2012.

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, p.481-494, 2010.

PEREIRA, B.L.C. et al. Influence of Chemical Composition of *Eucalyptus* Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v.8(3), p.4574-4592, 2013.

SWITHENBANK, J. et al. Wood would burn. **Biomass and Bioenergy**, v.35(3), p.999-1007, 2011.

VAN DER STELT, M.J.C et al. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p.3748-3762, 2011.

WILÉN, C. et al. Wood torrefaction – market prospects and integration with the forest and energy industry. **VTT Technology**163, 55 p, 2014.

CAPÍTULO 2

ESTUDOS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS PARA O TRATAMENTO TÉRMICO DE CAVACOS DE MADEIRA

Resumo: A torrefação é um tratamento térmico que promove alterações nas características energéticas da biomassa, tornando-a um combustível de maior qualidade em relação a sua matéria-prima. O princípio da torrefação está na degradação seletiva de alguns compostos orgânicos da biomassa que apresentam menor resistência térmica e menor poder calorífico. Neste sentido, o objetivo do presente capítulo foi avaliar o efeito das principais variáveis de torrefação na qualidade de cavacos de madeira. O experimento foi realizado em um reator de torrefação em fluxo semi-contínuo e aquecimento indireto. Foram torreficados cavacos de *Eucalyptus urophylla* com três umidades iniciais (0, 15 e 30% b.s.), em três temperaturas finais (220, 260 e 300°C) e três tempos de aquecimento (3, 9 e 15 minutos). Determinou-se a resistência à degradação térmica, composição química estrutural e as propriedades mecânicas dos cavacos torreficados e dos cavacos testemunha *in natura*. Na análise termogravimétrica, observou-se que os cavacos mais torreficados apresentaram maior estabilidade térmica em relação aos demais tratamentos e à testemunha, com menor taxa de perda de massa e maiores valores de massa residual. Verificou-se uma redução mais acentuada nos teores de polissacarídeos e um consequente aumento nos teores de ligninas em função do aumento da temperatura e do tempo de torrefação. Além disso, quanto menor a umidade inicial dos cavacos, menor foi o percentual de polissacarídeos após o tratamento. A durabilidade mecânica dos cavacos reduziu em função do nível de torrefação a que foram submetidos, enquanto a geração de finos aumentou. De modo geral, conclui-se a torrefação em maiores combinações de temperatura e tempo, com menores valores de umidade inicial, promove a concentração nos teores de lignina, aumento da resistência à degradação térmica e redução na resistência das propriedades mecânicas dos cavacos submetidos a esse tipo de tratamento térmico.

Palavras-chave: Composição Química, Análise Termogravimétrica e Propriedades Mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

A torrefação é um tratamento térmico aplicado a diferentes biomassas visando alterar suas propriedades químicas, físicas, mecânicas e térmicas. O tratamento consiste em submetê-las a um aquecimento controlado, em condições de baixa disponibilidade de oxigênio, para a eliminação de água e de alguns componentes orgânicos voláteis advindos da degradação parcial de extrativos e de componentes estruturais da parede celular (ARIAS et al., 2008; ESTEVES e PEREIRA, 2009). Como produto, tem-se um combustível com melhores características de manuseio e de combustão, tais como maior poder calorífico, maior teor de carbono, maior homogeneidade, maior resistência à degradação biológica e higroscopicidade reduzida (ESTEVES e PEREIRA, 2009; VAN DER STELT et al., 2011; MEDIC et al., 2012; CHEN et al., 2013; DU et al., 2014).

A biomassa lignocelulósica é um material orgânico heterogêneo composto por diferentes grupos de moléculas e polímeros, dentre os quais estão os polissacarídeos estruturais (celulose e hemiceluloses), as ligninas e os constituintes não estruturais (extrativos), além dos inorgânicos (cinzas) (YANG et al., 2007; PEREIRA et al., 2013). Apesar de serem formados basicamente pelo mesmo conjunto de elementos químicos, a resistência a degradação térmica é distinta entre eles (HAYKIRI-ACMA et al., 2010). A torrefação é aplicada em condições que propicie a degradação térmica seletiva apenas dos grupos mais instáveis à ação do calor e de menor potencial energético, na qual se incluem parte dos extrativos e das hemiceluloses (ESTEVES e PEREIRA, 2009). As perdas mássicas de celulose e ligninas são bastante reduzidas durante esse tipo de tratamento térmico, o que resulta em altos rendimentos gravimétricos com relação à tradicional carbonização (VAN DER STELT et al., 2011).

A temperatura máxima, o tempo de residência e o meio de aquecimento são as principais variáveis de processo que podem influenciar na qualidade e no rendimento da torrefação (ESTEVES e PEREIRA, 2009). As diferentes combinações possíveis entre essas variáveis resultam em diferentes produtos, variando desde uma secagem mais intensa até uma pré-carbonização da madeira. A composição química e a umidade inicial são algumas das principais variáveis intrínsecas a própria madeira que podem influenciar nos resultados da torrefação. A umidade é relevante porque impõe uma maior etapa de secagem ao processo, aumentando o tempo de residência

necessário para atender o nível de torrefação desejado, além de resultar em maiores gastos energéticos (BATES e GHONIEM, 2014).

Com isso, o objetivo geral do presente estudo foi avaliar os efeitos dos principais parâmetros (variáveis) do processo de torrefação nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de cavacos de madeira torreficados em um reator de fluxo semi-contínuo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Torrefação dos Cavacos

Foram utilizados cavacos obtidos do processamento de madeira de *Eucalyptus urophylla*, com aproximadamente sete anos de idade, em um picador laboratorial com duas peneiras classificadoras (10 e 40 mm). Foi realizada uma seleção manual retirando eventuais pedaços de cascas e cavacos visivelmente fora do padrão. Uma parcela desses cavacos selecionados foi climatizada em ambiente coberto com ventilação natural até os mesmos alcançarem umidade de 30 e 15% (base seca) e outra parcela foi seca em estufa com circulação de ar constante a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ para obtenção de cavacos com 0% de umidade, tendo assim três condições iniciais de umidade para a torrefação. Posteriormente, todas as amostras foram armazenadas separadamente em sacos de polietileno vedados para conservação e uniformização da umidade durante a execução do experimento.

As amostras foram torreficadas em um reator protótipo de torrefação em fluxo semi-contínuo, construído em estrutura de aço galvanizado, consistindo de quatro sistemas básicos (Figura 1) – o transporte da biomassa em fluxo semi-contínuo por rosca-sem-fim; o aquecimento indireto por troca de calor do gás de aquecimento com a tubulação metálica; o resfriamento indireto, em sequência, por meio de troca de calor com água; e o sistema de queima de combustível para a produção do gás de aquecimento necessário para fornecer energia térmica ao reator.

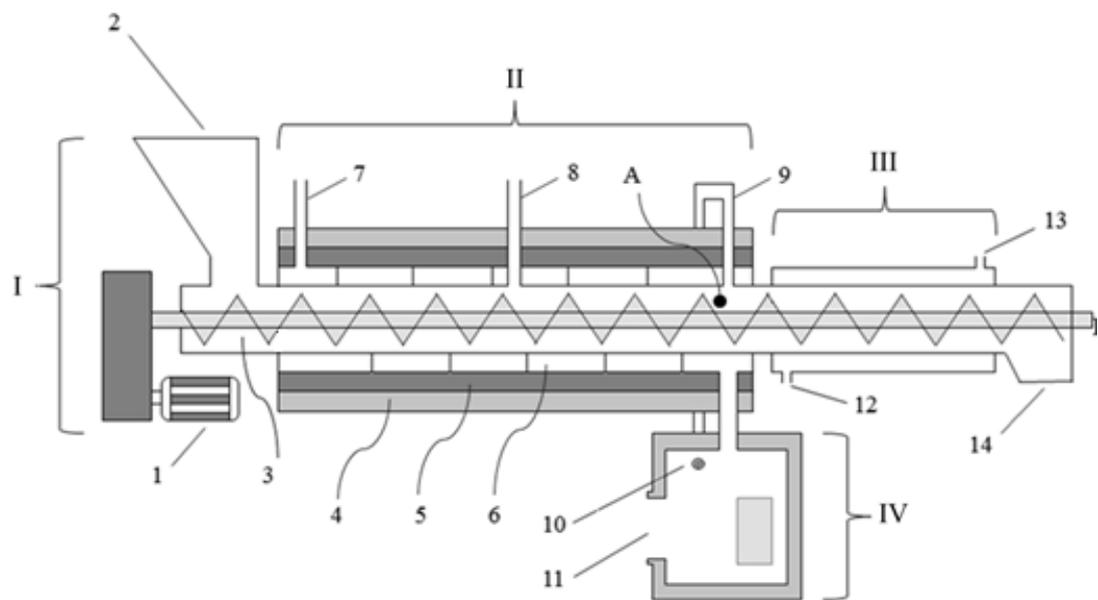


Figura 1. Layout em vista lateral do reator para torrefação de cavacos em fluxo semi-contínuo.

Sendo: I – Sistema de Transporte; II - Sistema de Aquecimento; III - Sistema de Resfriamento; IV – Sistema de Queima; 1 – Motor com redução; 2 – Silo/entrada de cavacos; 3 – Rosca-sem-fim; 4 – Camada Isolante; 5 – Camada Refratária; 6 – Fluxo do gás de aquecimento com barreiras (aletas); 7 – Exaustor Elétrico/Saída do gás de aquecimento; 8 – Primeira “chaminé”; 9 – Segunda “chaminé” conectada ao sistema de queima; 10 - Conexão da segunda “chaminé” com o sistema de Queima; 11 – Conexão do queimador na câmara quebra-chamas; 12 – Entrada de água; 13 – Saída de água; 14 – Saída dos cavacos torreficados; A – Local de coleta da temperatura final do tratamento.

O transporte dos cavacos dentro do reator foi realizado em contracorrente ao fluxo do gás de aquecimento, sendo que o acréscimo de temperatura dentro dele ocorreu no mesmo sentido de deslocamento da biomassa. A temperatura máxima de cada tratamento foi considerada a média registrada pelo termopar inserido no estágio final de aquecimento, representado pelo ponto A na Figura 1. A parede do invólucro cilíndrico (“camisa”) que envolve o estágio de aquecimento é revestida com cimento refratário e manta de fibra cerâmica para a conservação de calor dentro do reator.

O tempo de residência dos cavacos dentro do reator foi controlado por dois relés temporizadores analógicos que desligavam e acionavam o motor em tempos equidistantes após cada rotação completa da rosca-sem-fim. O tempo de residência de cada tratamento foi calculado como base no tempo de cada parada do motor e no número de rotações necessárias para a rosca-sem-fim transportar os cavacos por todo estágio de aquecimento. O sistema de transporte semi-contínuo dos cavacos com paradas programadas após cada rotação da rosca-sem-fim possibilitou a construção do reator em uma configuração mais compacta.

Foram torrificados aproximadamente três quilogramas de cavacos de madeira por tratamento. Após o processo, os mesmos foram armazenados em sacos de polietileno para a posterior utilização nas análises de caracterização do material.

2.2. Propriedades dos cavacos

A Composição Química Estrutural foi obtida para a determinação dos teores totais de Lignina, Polissacarídeos Estruturais, Extrativos e Cinzas. As amostras foram moídas e selecionadas entre as peneiras sobrepostas com malha de 40 e 60 mesh. O teor de extrativos totais foi determinado de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 2001). O teor de ligninas totais foi determinado de acordo com a metodologia utilizada por Pereira et al. (2013). O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma DIN EN 14775 (2009). O teor de polissacarídeos (celulose e hemiceluloses) foi determinado subtraindo os teores de ligninas, extrativos e cinzas a partir de 100%.

A resistência à degradação térmica dos cavacos torrificados foi determinada por meio da Análise Termogravimétrica, utilizando-se amostras moídas e selecionadas entre as peneiras sobrepostas de malha de 200 e 270 mesh. As análises foram realizadas em um aparelho DTG-60H Shimadzu sob atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de 50 ml/min e Taxa de Aquecimento de 10°C/min. A curva da Análise Termogravimétrica (TGA) foi obtida para avaliar a perda de massa em função da temperatura e a curva da Derivada Termogravimétrica (DTG) para identificar os pontos onde ocorreram os picos das perdas de massa.

As propriedades mecânicas dos cavacos foram determinadas por meio das análises de durabilidade mecânica e de geração de finos utilizando-se o equipamento Ligno-TesterHolmen® e seguindo uma adaptação da norma DIN EN 15210-1 (2010). Para determinação de finos foi aplicado um jato de ar com pressão de 30 mbar por 30 segundos em amostras de 100 gramas de cavacos selecionados na peneira de 10 milímetros. Posteriormente, foi aplicado outro jato de ar de 70 mbar por 60 segundos em amostras de 50 gramas dos cavacos submetidos à análise anterior para determinação da durabilidade mecânica.

2.3.Delineamento experimental

Foram instalados três experimentos que foram analisados de maneira independente, segundo um Delineamento Inteiramente Casualizado, com três repetições cada, a saber:

- Efeito “Temperatura final de torrefação”: Foram torreficados cavacos de *Eucalyptus urophylla*, absolutamente secos, em um tempo de aquecimento de 15 minutos e nas temperaturas finais de $220\pm 3^{\circ}\text{C}$, $260\pm 3^{\circ}\text{C}$ e $300\pm 3^{\circ}\text{C}$.
- Efeito “Tempo de residência de torrefação”: Foram torreficados cavacos de *Eucalyptus urophylla*, absolutamente secos, até a temperatura final de $300\pm 3^{\circ}\text{C}$, nos tempos de aquecimento do reator de 3, 9 e 15 minutos.
- Efeito “Umidade inicial dos cavacos”: Foram torreficados cavacos de *Eucalyptus urophylla*, com umidades iniciais de 0, 15 e 30% (base seca), até a temperatura final de $300\pm 3^{\circ}\text{C}$ e no tempo de aquecimento de 15 minutos.

Os dados de qualidade os cavacos foram submetidos aos testes Cochran (homogeneidade) e Lilliefors (normalidade). Posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de Tukey e com a testemunha pelo teste Dunnett, ambos a 5% de significância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 são apresentados os gráficos das Análises Termogravimétricas (TGA) e das Derivadas Termogravimétricas (DTG) dos cavacos torreficados.

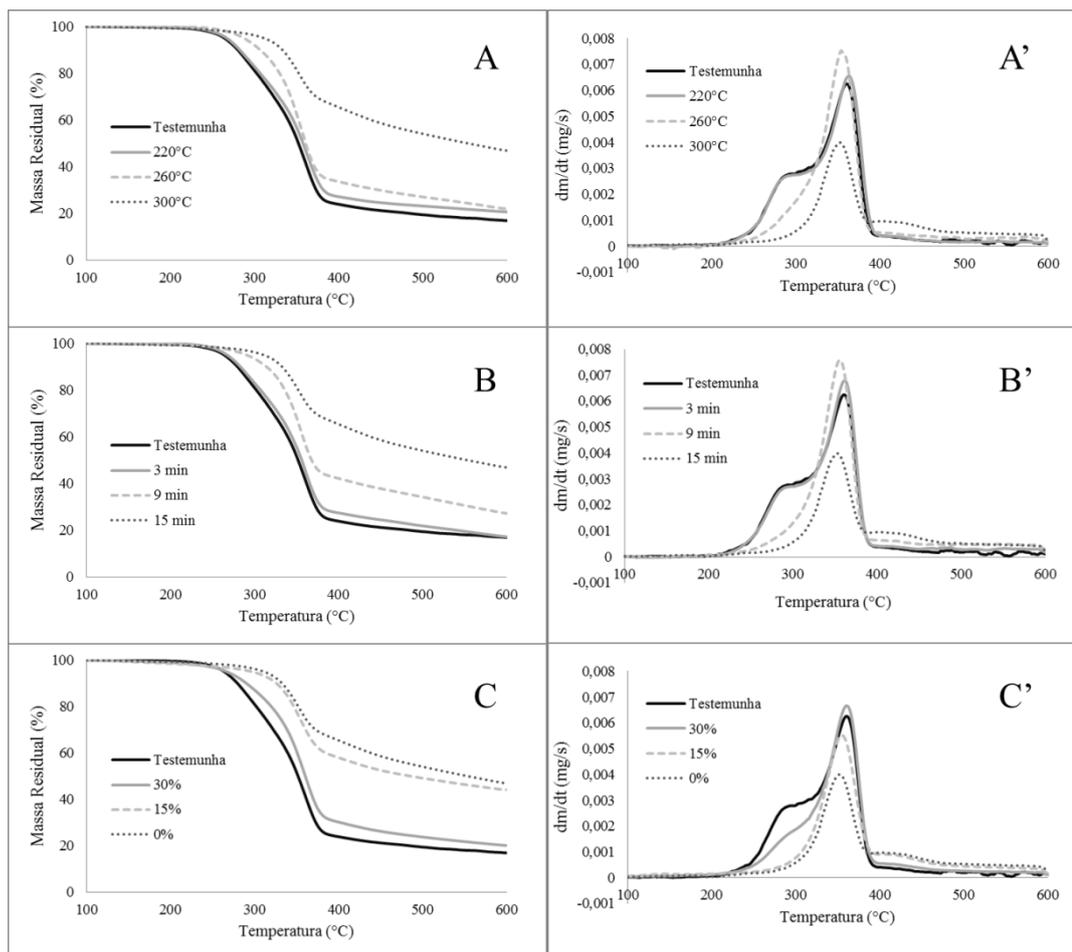


Figura 2 – Curvas obtidas a partir da Análise Termogravimétrica – TGA dos cavacos de *Eucalyptus urophylla* torreficados avaliando-se os efeitos da temperatura final (A), tempo de aquecimento (B) e umidade inicial (C), além das respectivas curvas da Derivada Termogravimétrica – DTG (A', B' e C').

O acréscimo na temperatura de torrefação promoveu um aumento na estabilidade térmica dos cavacos. Observa-se, na Figura 2A, que o início das perdas mássicas das amostras torreficadas a 300°C ocorreu em temperaturas mais elevadas em relação aos demais tratamentos, apresentando, conseqüentemente, maior massa residual.

O acréscimo no tempo de torrefação promoveu um aumento na estabilidade térmica dos cavacos (Figura 2B). O início das perdas mássicas das amostras torreficadas por um tempo de residência de 15 minutos aconteceu em temperaturas mais elevadas que as amostras dos demais tratamentos e da testemunha. Além disso, a massa residual deste tratamento também foi maior que as dos demais.

A quantidade inicial de água na madeira teve efeito inverso ao aumento da temperatura final e do tempo de residência do tratamento, uma vez que a umidade atrasa o início da degradação térmica. Observa-se que as alterações na resistência a

degradação térmica ocorreram de maneira mais acentuada nos cavacos mais secos que foram submetidos à torrefação (Figura 2C). Os cavacos torrificados com a umidade inicial de 0% apresentaram as mudanças mais discrepantes com relação às amostras testemunhas, enquanto os cavacos torrificados com umidade inicial de 30% não apresentaram as diferenças tão relevantes.

A degradação térmica tanto da testemunha quanto dos cavacos torrificados nas menores temperaturas ocorreu na faixa de temperatura entre 220 e 390°C, com uma perda de massa acentuada a partir de 330°C. Na Figura 2A', no gráfico da derivada termogravimétrica (DTG), é possível observar os picos de perda de massa em relação ao tempo ($\Delta m/\Delta t$) correspondentes ao observado no gráfico de TGA. Observa-se que houve um primeiro pico entre 220 e 330°C e um segundo, de maior intensidade, entre 330 e 390°C.

Para as amostras do tratamento a 260°C, foi observado um retardo no início da degradação térmica da madeira, ocorrendo somente em temperaturas superiores a 260°C. Além disso, houve uma perda de massa mais concentrada em uma faixa estreita de temperatura entre 260 e 390°C. A degradação ocorreu em um único pico de perda de massa, diferentemente dos cavacos da amostra testemunha e os torrificados a 220°C que apresentaram a degradação separada em dois picos.

As amostras submetidas à torrefação a 300°C apresentaram a maior estabilidade térmica em relação às demais. Observa-se que a maior perda de massa iniciou-se em temperaturas superiores a 300°C, sendo menos acentuadas que as amostras dos demais tratamentos. Essa maior degradação ocorreu até aproximadamente 380°C e acima desta temperatura a perda de massa foi menos acentuada. Além disso, a massa residual desse tratamento em temperaturas superiores a 400°C foi quase duas vezes maior que a apresentada pelos demais tratamentos.

O primeiro pico de perda de massa que ocorreu na madeira *in natura* é atribuído a degradação térmica característica das hemiceluloses (SHEN et al., 2010; BACH et al., 2014). A ausência desse pico nas amostras torrificadas em temperaturas superiores sugere, portanto, que a maior parte das hemiceluloses foi degradada durante o tratamento térmico. As hemiceluloses são mais reativas e susceptíveis a ação do calor devido à estrutura amorfa, pouco compactada, de baixo grau de polimerização e com quantidades elevadas de hidroxilas (YANG et al., 2007).

O segundo pico de perda de massa na madeira *in natura* é atribuído a degradação térmica da celulose (SHEN et al., 2010; BACH et al., 2014). Por ser um polissacarídeo homogêneo, a celulose apresenta também uma degradação bastante homogênea, concentrada em uma estreita faixa de temperatura. A celulose perfaz quase a metade da massa seca da madeira, explicando assim a maior intensidade da degradação térmica desse pico com relação ao primeiro (YANG et al., 2014). Nos tratamentos a 220 e 260°C, nota-se que esse segundo pico tende a aumentar com relação à testemunha devido à degradação das hemiceluloses que fez com que, conseqüentemente, houvesse uma concentração dos teores de celuloses na fração sólida final. Já no tratamento a 300°C, o segundo pico apresenta um decréscimo acentuado, indicando que além das hemiceluloses, nesta temperatura também foi degradado parte da celulose.

Não se observou nenhum pico típico de perda das ligninas e isso se deve a sua baixa taxa de degradação térmica (SHEN et al., 2010; BACH et al., 2014). As ligninas são macromoléculas formadas por unidades aromáticas que caracteristicamente são compostos de alta estabilidade a degradação (YANG et al., 2007). Assim, a massa residual obtida acima de 450°C pode ser atribuída quase a totalidade as ligninas, e uma pequena fração devido as cinzas e outros compostos parcialmente degradados (PEREIRA et al., 2013). A maior massa residual dos cavacos torreficados a 300°C, com taxas significativas de perdas de massa acima dos 450°C (Figura 2A'), indica uma maior concentração nos teores de ligninas nas amostras deste tratamento.

O aumento segundo pico de perda de massa dos cavacos torreficados por 9 minutos com relação aos cavacos testemunhas (Figura 2B') indica uma concentração nos teores de celulose no material em decorrência da degradação das hemiceluloses. Nos cavacos torreficados por 15 minutos há um decréscimo acentuado desse segundo pico, indicando que, além das hemiceluloses, as condições do tratamento foram suficientes para iniciar a degradação significativa de celulose. Já a maior massa residual apresentada pelos tratamentos com maior tempo de residência está associada, possivelmente, a concentração nos teores de lignina no produto sólido final.

As tendências observadas nos cavacos torreficados evidenciam o fato de que diferentes combinações de tempo e temperatura resultam em produtos com propriedades gerais diferentes entre si (ARIAS et al., 2008; PEREIRA e ESTEVES,

2009; VAN DER STELT et al., 2011). A madeira é, caracteristicamente, um material de baixa condutibilidade térmica, assim a transferência de calor entre os cavacos não ocorre de maneira imediata. É necessário que as amostras sejam expostas a uma fonte de calor por períodos de tempo suficientes para que as reações da degradação térmica ocorram. Assim, tanto o aumento da temperatura final quanto no tempo de residência podem ocasionar maiores perdas de massa (ARIAS et al., 2008; PEREIRA e ESTEVES, 2009).

As alterações pouco significativas na resistência a degradação térmica dos cavacos mais úmidos (30%) submetidos à torrefação com relação aos cavacos *in natura*, evidenciam que o teor de água na madeira retarda as reações da torrefação (Figura 2C'). Quando não há a secagem prévia da madeira, a etapa inicial de secagem é estendida, atrasando o início das modificações na estrutura e constituição da biomassa (BATES e GHONIEM, 2014). Essa etapa inicial pode ocorrer até toda a biomassa alcançar a temperatura de aproximadamente 150°C, fase endotérmica onde há a eliminação de água na forma de vapor (ESTEVES e PEREIRA, 2009).

Assim, mesmo quando mantida a temperatura e o tempo de tratamento, o nível da torrefação é variável em função da umidade inicial da matéria-prima. Para manter a qualidade e o rendimento de processo, é necessário que os cavacos utilizados estejam com o mínimo de umidade possível. Contudo, a utilização de secadores artificiais ou estufa para uma maior redução desses teores é indicada apenas quando esta opção for econômica e operacionalmente mais viável do que aumentar o tempo do próprio processo de torrefação.

Na Tabela 1 são apresentados os teores médios de polissacarídeos estruturais, ligninas totais, extrativos totais, e cinzas dos cavacos submetidos ao processo de torrefação.

Tabela 1 – Composição química estrutural de cavacos de *Eucalyptus urophylla* torreficados em reator de fluxo semi-contínuo em função dos tratamentos

EFEITO	Variável	Polissacarídeos Estruturais (%)	Ligninas Totais (%)	Extrativos Totais(%)	Cinzas (%)
Testemunha	---	75,4	21,7	2,8	0,1
Temperatura Final	220°C	74,2 a	23,6 c	2,0 b*	0,2 b
	260°C	59,5 b*	33,8 b*	6,5 a*	0,2 b
	300°C	21,6 c*	70,4 a*	7,4 a*	0,6 a*
Tempo de Residência	3 min	73,1 a	23,6 c	3,2 b	0,1 b
	9 min	56,8 b*	35,7 b*	7,2 a*	0,3 b*
	15 min	21,6 c*	70,4 a*	7,4 a*	0,6 a*
Umidade Inicial	0%	21,6 c*	70,4 a*	7,4 a*	0,6 a*
	15%	41,8 b*	50,0 b*	7,6 a*	0,6 a*
	30%	66,5 a*	26,9 c*	6,2 b*	0,4 a*

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si na coluna dentro de cada efeito pelo Teste Tukey a 5%. Médias seguidas de asterisco (*) diferem significativamente da testemunha a 5% pelo Teste Dunnett.

Observa-se que tanto a temperatura e o tempo de torrefação quanto a umidade inicial afetaram significativamente na composição química de cavacos torreficados (Tabela 1). O aumento da temperatura e do tempo de torrefação, assim como a redução na umidade inicial dos cavacos, reduziu os teores de polissacarídeos estruturais e elevou os teores de lignina, extrativos e cinzas.

Para o efeito temperatura, as alterações mais acentuadas na composição química dos cavacos ocorreram nos tratamentos realizados a 260 e 300°C, evidenciando que a degradação térmica iniciou-se de maneira significativa depois de atingidas essas temperaturas. O mesmo foi observado para o efeito tempo de residência, onde as alterações químicas aconteceram de forma mais acentuada entre 9 e 15 minutos, mostrando que é necessário um tempo mínimo de exposição ao calor para que ocorram as reações da torrefação. A umidade inicial dos cavacos apresentou relação inversa com a intensidade da degradação térmica dos mesmos durante a torrefação. Consequentemente, as maiores alterações na composição química, com relação aos cavacos testemunha, foram observadas para os cavacos torreficados com umidade inicial de 0%.

A redução dos teores de polissacarídeos se deve a sua maior susceptibilidade a degradação térmica quando comparados com o grupo das ligninas (YANG et al., 2007), sendo as hemiceluloses os compostos mais facilmente degradados. Apesar de todos os polissacarídeos serem formados por unidades básicas de carboidratos, a

celulose é caracteristicamente mais estável a ação da temperatura do que as hemiceluloses. A diferença se encontra no fato da celulose ser mais homogênea, não ramificada e com alto grau de polimerização, o que permite uma estrutura mais compacta e parcialmente cristalina (YANG et al., 2007)

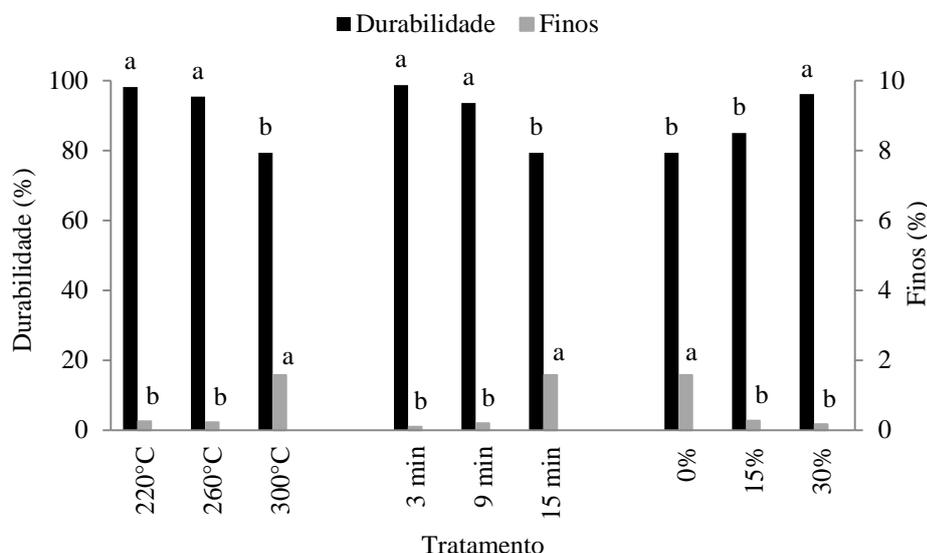
Os teores de ligninas aumentaram em consequência da degradação dos polissacarídeos estruturais. Nas condições da torrefação, a degradação térmica das ligninas ocorre em baixas proporções e em taxas pouco significativas, concentrando assim os seus teores na fração residual torrificada. As ligninas são macromoléculas complexas formadas por unidades aromáticas com alta estabilidade térmica e maiores concentrações de carbono (YANG et al., 2007; HAYKIRI-ACMA et al., 2010). Assim, as ligninas são os compostos que mais contribuem no rendimento em materiais sólidos dos processos de tratamento térmico, onde o objetivo é aumentar as concentrações de carbono da matéria-prima (PEREIRA et al., 2013).

Os teores de extrativos aumentaram nos cavacos mais torreficados em relação aos cavacos *in natura*, todavia essa tendência não condiz com o fato de uma fração desses compostos ser teoricamente degradada e eliminada na condição de compostos voláteis durante a torrefação. Esse aumento pode ter acontecido pela contabilização de resíduos da degradação parcial dos polissacarídeos e das ligninas (ESTEVES et al., 2011). Segundo Brito et al., (2008), às modificações químicas e físicas ocorridas na estrutura desses resíduos ao serem expostos a altas temperaturas podem torná-los compatíveis com a sequência de extrações utilizada durante a análise química, sendo então erroneamente contabilizados como falsos extrativos.

Os teores de cinzas aumentaram em consequência da degradação da biomassa, uma vez que as cinzas são inorgânicos não degradáveis nas condições da torrefação, aumentando assim suas concentrações na fração residual torrificada. O aumento dos teores de cinzas é indesejável, pois além de não contribuir energeticamente durante a combustão, ainda diminuem a vida-útil dos equipamentos de queima por apresentar alguns constituintes abrasivos e/ou corrosivos e por aumentar os gastos com a limpeza dos mesmos (PEREIRA et al., 2013; KORUS e SZLEK, 2015).

Na Figura 6 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas dos cavacos torreficados em função dos tratamentos. Observa-se que o aumento tanto da temperatura quanto do tempo de torrefação promoveu uma redução na

durabilidade mecânica e um aumento na geração de finos, enquanto o aumento da umidade inicial apresentou tendência inversa.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si na análise dentro de cada efeito pelo Teste Tukey a 5%.

Figura 6 – Propriedades mecânicas dos cavacos de *Eucalyptus urophylla* torreficados em um reator de fluxo semi-contínuo em função dos efeitos temperatura final, tempo de residência e umidade inicial.

O aumento na temperatura e no tempo de torrefação, assim como a redução da umidade inicial, influenciou na redução da durabilidade mecânica e no aumento da geração de finos dos cavacos torreficados. A aplicação de calor promoveu a degradação de uma fração dos polissacarídeos presentes na biomassa, o que desestabilizou a estrutura da parede celular, diminuindo a sua tenacidade, deixando-a mais friável e mais facilmente reduzida a partículas (VAN DER STELT et al., 2011; KOKKO et al., 2012). A redução da durabilidade mecânica e o aumento da geração de finos dos cavacos refletem a menor capacidade dos cavacos torreficados permanecerem intactos, sem se desintegrar quando submetido a algum esforço mecânico (TUMULURU, 2014).

A menor durabilidade mecânica dos cavacos torreficados pode ser considerada vantajosa do ponto de vista tecnológico, visto que esse tipo de biomassa é utilizado principalmente como matéria-prima na produção de pellets e briquetes ou destinado à gaseificação e ao uso em sistemas co-firing junto com carvão mineral (ARIAS et al., 2008; VAN DER STELT et al., 2011; KUO et al., 2014). Para atender esses fins é necessário primeiro que o material seja reduzido a partículas para conseguir obter altos índices de eficiência e qualidade dos processos citados. A

madeira *in natura* é uma biomassa bastante fibrosa, o que dificulta e eleva os gastos energéticos com a sua moagem (KOKKO et al, 2012).

Logo, a torrefação é aplicada também como uma alternativa para aumentar a moabilidade do material ao diminuir sua resistência mecânica (PHANPHANICH e MANI, 2011; VAN ESSENDELFT et al., 2013). A moabilidade é um índice de qualidade que não possui norma específica de determinação e é de difícil mensuração devido à variada e heterogênea gama de biomassas existentes com morfologias desuniformes entre si (VAN ESSENDELFT et al., 2013). Os testes de durabilidade mecânica e finos, adaptados das normas de qualidade mecânica de biomassas densificadas, portanto, foi realizada no intuito de se conseguir uma estimativa dessa facilidade de moagem dos cavacos submetidos ao processo de torrefação.

4. CONCLUSÕES

- O aumento da temperatura final e do tempo de aquecimento, assim como a redução da umidade inicial, ocasiona maiores alterações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos cavacos submetidos ao processo de torrefação.
- Os cavacos torrificados apresentaram maior resistência à degradação térmica em relação aos cavacos *in natura*, sendo mais estáveis as altas temperaturas, com início tardio da degradação, taxas menores de perda de massa e maiores valores de massa residual.
- Os cavacos torrificados apresentam menores teores de polissacarídeos estruturais e maiores teores de lignina, extrativos e cinzas com relação aos cavacos *in natura*.
- Os cavacos torrificados apresentaram menor durabilidade mecânica e maior geração de finos com relação aos cavacos *in natura*.
- Nas condições específicas do presente estudo, as alterações mais significativas foram observadas para os cavacos de *Eucalyptus urophylla*, absolutamente secos, submetidos ao processo de torrefação até a temperatura de 300°C por um tempo de aquecimento igual a 15 minutos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIAS, B. et al. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**, v.89, p.169-175, 2008.

BACH, Q. et al. Effects of wet torrefaction on reactivity and kinetics of wood under air combustion conditions. **Fuel**, v.137, p.375-383, 2014.

BATES, R.B.; GHONIEM, A.F. Modeling kinetics-transport interactions during biomass torrefaction: The effects of temperature, particle size, and moisture content. **Fuel**, V.137, P.216-229, 2014.

BRITO, J.O. et al. Chemical composition changes in *Eucalyptus* and *Pinus* woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, v.99 (18), p.8545-8548, 2008.

CHEN, W. et al. Biomass torrefaction characteristics in inert and oxidative atmospheres at various superficial velocities. **Bioresource Technology**, v.146, p.152-160, 2013.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - **DIN EN 14775**: Determination of ash content. Berlin: CEN, 2009. 12 p.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG- **EN 15210-1**: Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets. Berlin: CEN, 2010. 12 p.

DU, S.; CHEN, W.; LUCAS, J.A. Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. **Bioresource Technology**, v.161, p-333-339, 2014.

ESTEVEZ, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, v.4(1), p.370-404. 2009.

ESTEVEZ, B.; VIDEIRA, R.; PEREIRA, H. Chemistry and ecotoxicity of heat treated pine wood extractives. **Wood Science Technology**, v.45(6), p.661-676, 2011.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S.; KUCUKBAYRAK, S. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v.91, p.759-764, 2010.

KOKKO, L. et al. Comparing the energy required for fine grinding torrefied and fast heat treated pine. **Biomass and Bioenergy**, v.42, p.219-223, 2012.

KORUS, A.; SZLEK, A. The effect of biomass moisture content on the IGCC efficiency. **Biomass and Bioenergy**, v.80, P.222-228, 2015.

KUO, P.; WU, W.; CHEN, W. Gasification performances of raw and torrefied biomass in a downdraft fixed bed gasifier using thermodynamic analysis. **Fuel**, v.117, p.1231-1241, 2014.

MEDIC, D. et al. Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. **Fuel**, v.91, p.147-154, 2012.

PEREIRA, B.L.C. et al. Influence of Chemical Composition of *Eucalyptus* Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v.8(3), p.4574-4592, 2013. 2013.

PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. **Bioresource Technology**, v.102, p.1246-1253, 2011.

SHEN, D.K.; GU, S.; BRIDGWATER, A.V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicelluloses. **Carbohydrate Polymers**, V.82, p.39-45, 2010.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. TAPPI test methods **T204 om-88**: solvent extractives of wood and pulp. In: TAPPI Standart Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TUMULURU, J.S. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. **Biosystems Engineering**, v.119, p.44-57, 2014.

VAN DER STELT, M.J.C et al. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p.3748-3762, 2011.

VAN ESSENDELFT, D.T.; ZHOU, X.; KANG, B.S. Grindability determination of torrefied biomass materials using the Hybrid Work Index. **Fuel**, v.105, p.103-111, 2013.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v.86, p.1781-1788, 2007.

CAPÍTULO 3

POTENCIAL ENERGÉTICO DE CAVACOS DE EUCALIPTO TORRIFICADOS EM REATOR DE FLUXO SEMI-CONTÍNUO

Resumo: A torrefação é um tratamento térmico que pode tornar a madeira mais atrativa energeticamente por amenizar algumas de suas características indesejáveis e aumentar a sua qualidade como fonte combustível. Neste sentido, o objetivo desse capítulo foi avaliar o potencial energético de cavacos torreficados de eucalipto, uma das mais importantes espécies florestais cultivadas no Brasil. A torrefação dos cavacos foi realizada em um reator de fluxo semi-contínuo com aquecimento indireto. O experimento seguiu um arranjo de três temperaturas finais de torrefação combinadas com três tempos de aquecimento, totalizando nove tratamentos com três repetições cada, além da testemunha de cavacos *in natura*. Após o tratamento térmico, determinou-se a composição química imediata e elementar; umidade de equilíbrio higroscópico; tamanho médio; poder calorífico; e densidade a granel e energética dos cavacos. Observou-se que a temperatura e o tempo de torrefação influenciaram diretamente na redução dos teores de materiais voláteis e de oxigênio elementar e, conseqüentemente, em uma maior concentração dos teores relativos de carbono e no poder calorífico dos cavacos. A umidade de equilíbrio higroscópico e o tamanho médio dos cavacos foram reduzidos pela torrefação. O teor de hidrogênio e as densidades a granel e energética apresentaram tendências polinomiais quadráticas, com aumento inicial, estabilização e decréscimo posterior em função do nível de torrefação. De modo geral, concluiu-se que cavacos de eucalipto torreficados em combinações de maiores temperaturas e tempo apresentam potencial energético elevado em relação à matéria-prima *in natura*, evidenciando que a torrefação é tecnicamente viável.

Palavras-chave: Torrefação; Madeira; Poder Calorífico; Densidade Energética.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um dos combustíveis com menor custo de produção e que atende a maioria dos preceitos ambientais e sociais se devidamente utilizada. Todavia, tanto na forma de lenha quanto processada na condição de cavacos, a madeira apresenta baixa competitividade dentro do atual mercado de energia em virtude dos altos valores de umidade, baixas densidades energéticas e heterogeneidade elevada

(WANG et., 2013; POUDEL et al., 2015). Justifica-se, portanto, a aplicação de pré-tratamentos que possam amenizar essas características indesejáveis, tornando a madeira um combustível de maior potencial energético com relação a sua matéria-prima. Dentre as possibilidades existentes, os tratamentos térmicos são uns dos mais estudados e utilizados atualmente.

A torrefação é um tipo de tratamento térmico, intermediário entre a secagem e a carbonização, que desperta recente interesse do mercado de energia. O tratamento consiste no aquecimento controlado da madeira, em condições de baixa disponibilidade de oxigênio e em combinações de tempo e temperatura inferiores as comumente utilizadas na carbonização (ESTEVES e PEREIRA, 2009; ALMEIDA et al., 2010). O material torreficado apresenta redução no teor de umidade e de higroscopicidade, além do aumento no teor de carbono e de energia e homogeneidade elevada (ROUSSETT et al., 2011; WANG et al., 2013). Ressalta-se que o processo de torrefação apresenta maiores rendimentos em massa e energia em relação ao processo tradicional de carbonização por não degradar quantidades significativas de celulose, além de alta produtividade devido ao menor tempo necessário para o tratamento em si (VAN DER STELT et al., 2011).

Diversas biomassas podem ser submetidas ao processo de torrefação, sejam elas de origem agrícola ou florestal, destacando-se a madeira do gênero eucalipto. Esta é a principal biomassa florestal cultivada no Brasil que atende parte da matriz energética do país, gerando outros impactos positivos como a geração de renda e de empregos (ALMEIDA et al., 2010; IBÁ, 2015). A torrefação da madeira de eucalipto, apesar de elevar os custos de produção, é uma alternativa interessante do ponto de vista comercial por agregar valor ao produto, possibilitando alcançar maiores valores de comercialização. Além disso, a torrefação ainda pode viabilizar mercados ainda pouco acessíveis à madeira na condição *in natura*, como a exportação para consumo doméstico e em rotas de peletização, gaseificação e sistemas de cogeração de energia elétrica (WANG et al., 2013; PENG et al., 2013).

Nesse contexto, o objetivo do presente capítulo foi avaliar o potencial energético de cavacos de eucalipto torreficados em diferentes combinações de tempo e temperatura utilizando um reator de fluxo semi-contínuo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Torrefação dos Cavacos

Foram utilizados cavacos provenientes de madeira de *Eucalyptus urophylla*, com aproximadamente sete anos de idade, obtidos a partir de um picador laboratorial com duas peneiras classificadoras (10 e 40 mm). Após o cavaqueamento da madeira, realizou-se uma seleção manual dos mesmos retirando eventuais pedaços de cascas e cavacos visivelmente foras do padrão. Posteriormente, os cavacos foram secos em estufa com circulação de ar constante a $103\pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem massa absolutamente seca. As amostras secas foram armazenadas em sacos de polietileno devidamente vedados para evitar a adsorção da umidade durante a execução do experimento.

As amostras foram torreficadas em um reator protótipo de torrefação em fluxo semi-contínuo, construído em estrutura de aço galvanizado, consistindo de quatro sistemas básicos (Figura 1) – o transporte da biomassa em fluxo semi-contínuo por rosca-sem-fim; o aquecimento indireto por troca de calor do gás de aquecimento com a tubulação metálica; o resfriamento indireto, em sequência, por meio de troca de calor com água; e o sistema de queima de combustível para a produção do gás de aquecimento necessário para fornecer energia térmica ao reator.

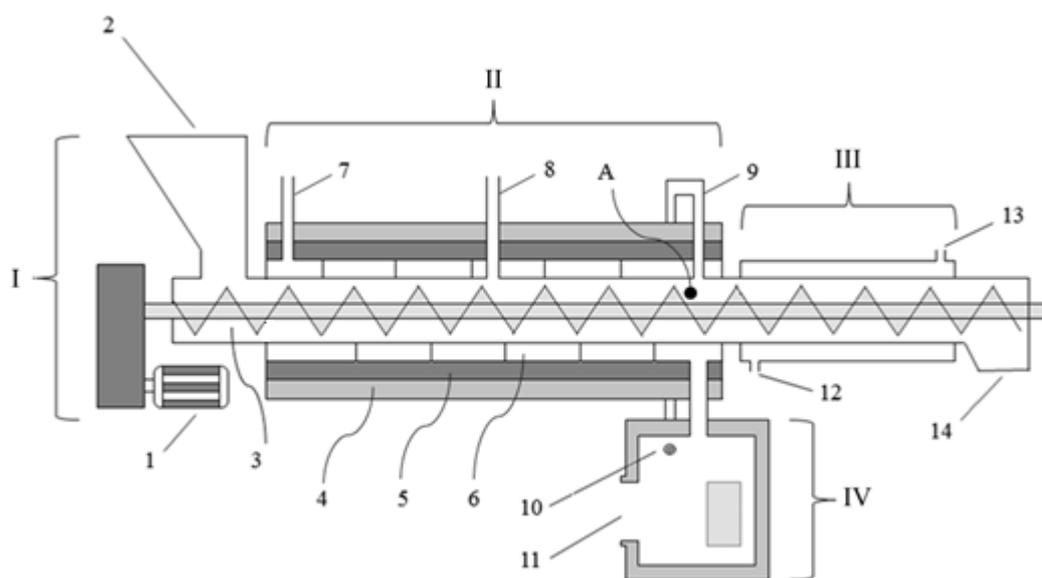


Figura 1. Layout em vista lateral do reator para torrefação de biomassa (cavacos de madeira) em fluxo semi-contínuo.

Sendo: I – Sistema de Transporte; II - Sistema de Aquecimento; III - Sistema de Resfriamento; IV – Sistema de Queima; 1 – Motor com redução; 2 – Silo/entrada de cavacos; 3 – Rosca-sem-fim; 4 – Camada Isolante; 5 – Camada Refratária; 6 – Fluxo do gás de aquecimento com barreiras (aletas); 7 – Exaustor Elétrico/Saída do gás de aquecimento; 8 – Primeira “chaminé”; 9 – Segunda “chaminé” conectada ao sistema de queima; 10 - Conexão da segunda “chaminé” com o sistema de Queima; 11 – Conexão do queimador na câmara quebra-chamas; 12 – Entrada de água; 13 – Saída de água; 14 – Saída dos cavacos torreficados; A – Local de coleta da temperatura final do tratamento.

O transporte dos cavacos dentro do reator foi realizado em contracorrente ao fluxo do gás de aquecimento, logo o acréscimo de temperatura dentro dele ocorreu no mesmo sentido de deslocamento dos cavacos. A temperatura máxima de cada tratamento foi considerada a média registrada pelo termopar inserido no estágio final de aquecimento, representado pelo ponto A na Figura 1. A parede do invólucro cilíndrico (“camisa”) que envolve o estágio de aquecimento é revestida com cimento refratário e manta de fibra cerâmica para a conservação de calor dentro do reator.

O tempo de residência dos cavacos dentro do reator foi controlado por dois relés temporizadores analógicos que desligavam e acionavam o motor em tempos equidistantes após cada rotação completa da rosca-sem-fim. O tempo de residência de cada tratamento foi calculado a partir do tempo de cada parada do motor e o número de rotações necessárias para a rosca-sem-fim transportar os cavacos por todo estágio de aquecimento. O sistema de transporte semi-contínuo dos cavacos com paradas programadas após cada rotação da rosca-sem-fim possibilitou a construção do reator em uma configuração mais compacta.

Foram torrificados aproximadamente três kg de cavacos de madeira por tratamento. Após o processo, os mesmos foram armazenados em sacos de polietileno até serem utilizados nas etapas de qualificação do potencial energético dos materiais.

2.2. Propriedades dos cavacos

A composição química imediata dos cavacos foi obtida com amostras moídas, selecionadas entre peneiras sobrepostas com malhas de 40 e 60 mesh e absolutamente secas para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo seguindo os procedimentos normatizados pela ABNT NBR 8112 (1983). A análise foi adaptada com cadinhos de porcelana e reduzindo para 600°C a etapa de determinação de cinzas.

A composição química elementar foi obtida com amostras moídas e selecionadas entre peneiras sobrepostas com malhas de 200 e 270 mesh, para determinação dos teores elementares de carbono, hidrogênio e oxigênio de acordo com a norma DIN EN 15104 (2011b). O equipamento utilizado foi Vario Micro Cube CHNS-O que proporciona a combustão completa do material, gerando os gases que são contabilizados em uma sequência induzida de acordo com a massa molecular de cada elemento.

O tamanho médio dos cavacos foi estimado com um conjunto de cinco peneiras sobrepostas variando gradualmente de 6 até 30 mm a partir da base vedada. Amostras de cavacos, de aproximadamente 1000 cm³, foram submetidas à vibração constante por cinco minutos em um agitador de peneiras eletromagnético. O tamanho médio foi calculado pela ponderação entre a massa de cavacos retida em cada peneira e a média de abertura da sua malha e a superior.

A densidade a granel foi obtida dividindo-se a massa de cavacos, necessária para preencher um recipiente cilíndrico, pelo volume interno do mesmo, segundo as normas da DIN EN 15103 (2010c). A Umidade de Equilíbrio Higroscópico foi calculada em base seca seguindo as normas da DIN EN 14774-1 (2010a). Para ambas as análises, as amostras de cavacos foram previamente climatizadas na umidade relativa ($\pm 65\%$) e de temperatura ($\pm 23^\circ\text{C}$) até entrarem em equilíbrio.

O Poder Calorífico Superior (PCS) das amostras de cavacos torreficados foi determinado em uma bomba calorimétrica adiabática IKA300 e o Poder Calorífico Útil (PCU) do estimado seguindo as normativas da DIN EN 14918 (2010b). Os valores de umidade utilizado nos cálculos de PCU foram os obtidos nas condições de equilíbrio higroscópico. A densidade energética (MJ/m³) foi estimada multiplicando a densidade a granel pelo PCU da amostra de cada tratamento.

2.3.Delineamento Experimental

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, em arranjo de três temperaturas finais (220, 260 e 300°C) e três tempos de aquecimento (3, 9 e 15 minutos), com três repetições cada, além da testemunha de cavacos *in natura*.

Os dados foram submetidos à análise de regressão, ajustando os modelos lineares ($Y_{temperatura} = a.x + b + e$) e polinomiais quadráticos ($Y_{temperatura} = a.x^2 + b.x + c + e$) de acordo com a dispersão dos dados observados e estimados com os respectivos coeficientes de determinação. Onde “ $Y_{temperatura}$ ” é o valor estimado em cada temperatura avaliada; “ x ” é a variável tempo de torrefação; “ a ”, “ b ” e “ c ” são as constantes obtidas para a equação e “ e ” é o erro associado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 são apresentados os valores observados e estimados da composição química imediata dos cavacos torreficados e as respectivas equações

ajustadas. A exceção das equações obtidas para os teores de materiais voláteis e de carbono fixo para os cavacos torreficados a 220°C, todos os demais tratamentos apresentaram ajustes significativos a 5% de significância. As equações com ajuste não significativos ocorreram porque não houve alterações significativas nas propriedades desses cavacos, sendo a variância entre as repetições da análise de cada tratamento maior que a variância entre as médias dos tratamentos.

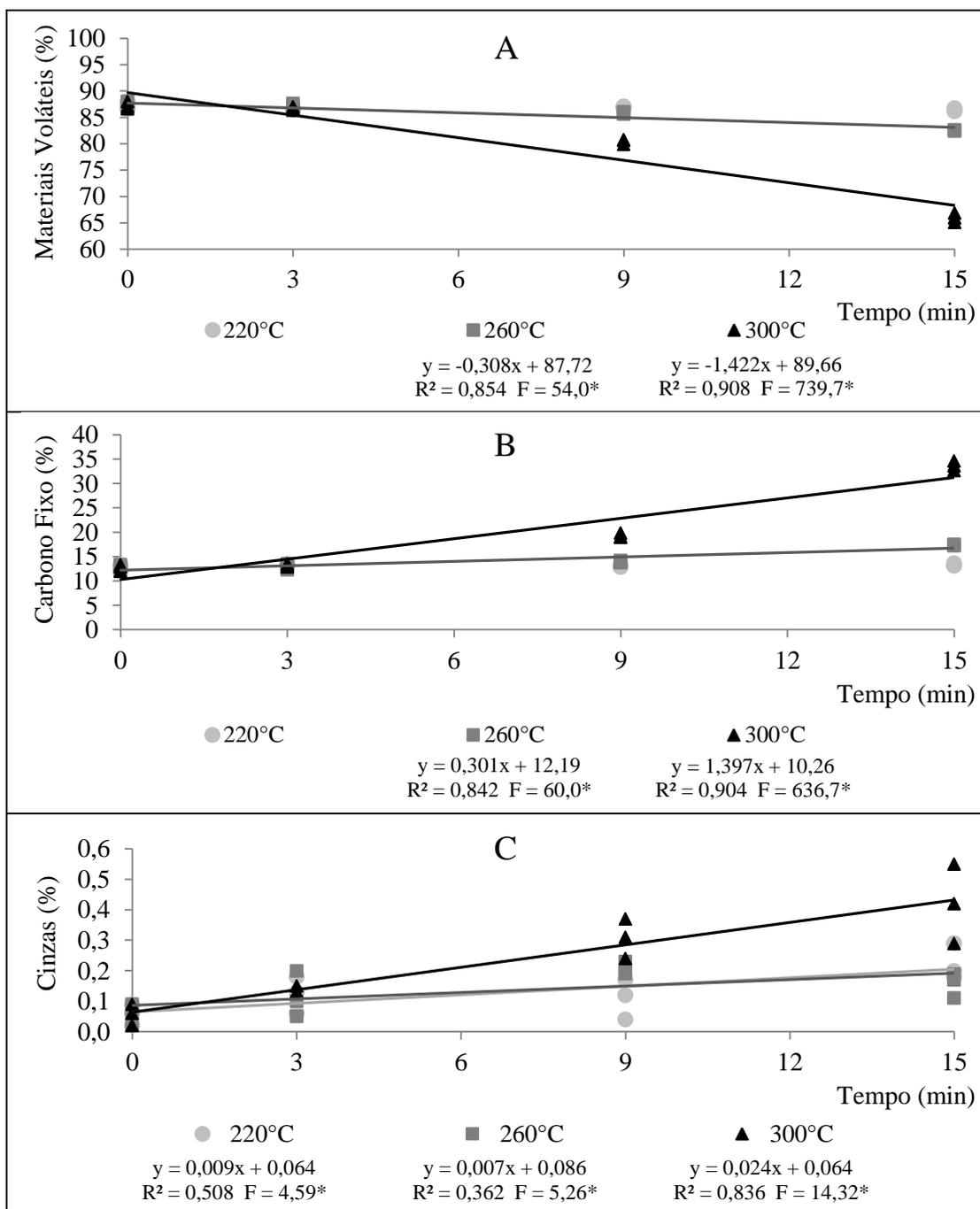


Figura 2 – Valores observados e estimados de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas de cavacos torreficados de *Eucalyptus urophylla* em função do tempo para cada temperatura.

Conforme observado na Figura 2A, a torrefação nas três temperaturas avaliadas promoveu um decréscimo dos teores de materiais voláteis em função do tempo de aquecimento, contudo o efeito do tempo não foi significativo para o tratamento a 220°C. A torrefação a 300°C apresentou a tendência linear com maior decréscimo por unidade de tempo, evidenciando que o tratamento térmico em temperaturas mais elevadas promove uma maior eliminação da fração de compostos voláteis dos cavacos. O teor de carbono fixo (Figura 2B) e de cinzas (Figura 2C) apresentaram tendências inversas, com aumentos dos teores em função do tempo, sendo os maiores acréscimos e os maiores R² observados também para o tratamento a 300°C.

As alterações na composição química da madeira torrificada se devem a degradação térmica dos seus constituintes, principalmente, das hemiceluloses e da fração mais volátil dos extrativos. Cabe salientar que essa degradação ocorre de maneira heterogênea e está diretamente relacionada aos distintos níveis de estabilidade térmica destes constituintes orgânicos (YANG et al., 2007; HAYKIRI-ACMA et al., 2010). As hemiceluloses apresentam menor estabilidade térmica e são as preferenciais e seletivamente degradadas durante a torrefação, sendo eliminadas na condição de gases voláteis (BACH et al., 2014; DU et al., 2014).

Deste modo, permanece no material torrificado uma fração residual constituída majoritariamente pela massa de celulose e lignina. Tanto a celulose – polissacarídeos de alto peso molecular – quanto as ligninas – compostos fenólicos – apresentam maior relação carbono/oxigênio que as hemiceluloses, o que reflete diretamente nas alterações da composição química dos cavacos torificados (YANG et al., 2007). Assim, a eliminação dos materiais voláteis, advindos da degradação preferencial das hemiceluloses, resulta na conseqüente concentração dos teores de carbono fixo nos cavacos torificados.

As cinzas são constituídas por elementos inorgânicos e não degradáveis nas condições da torrefação. A degradação parcial dos demais constituintes da madeira resulta, portanto, na conseqüente concentração dos teores de cinzas nos cavacos torificados. As cinzas são indesejáveis do ponto de vista tecnológico, pois não contribuem para o potencial calorífico do combustível e causam transtornos operacionais, como corrosão e abrasão dos equipamentos de queima e aumento nos gastos com a limpeza dos mesmos (PEREIRA et al., 2013). Todavia, os teores de cinzas dos cavacos torificados permaneceram dentro dos limites das principais

normas de qualidade, como a DIN EN 14961-4 (2011a) que exige valores inferiores a 1% para cavacos de classe A.

Na Figura 3 são apresentados os valores observados e estimados da composição química elementar dos cavacos torreficados e as suas respectivas equações ajustadas.

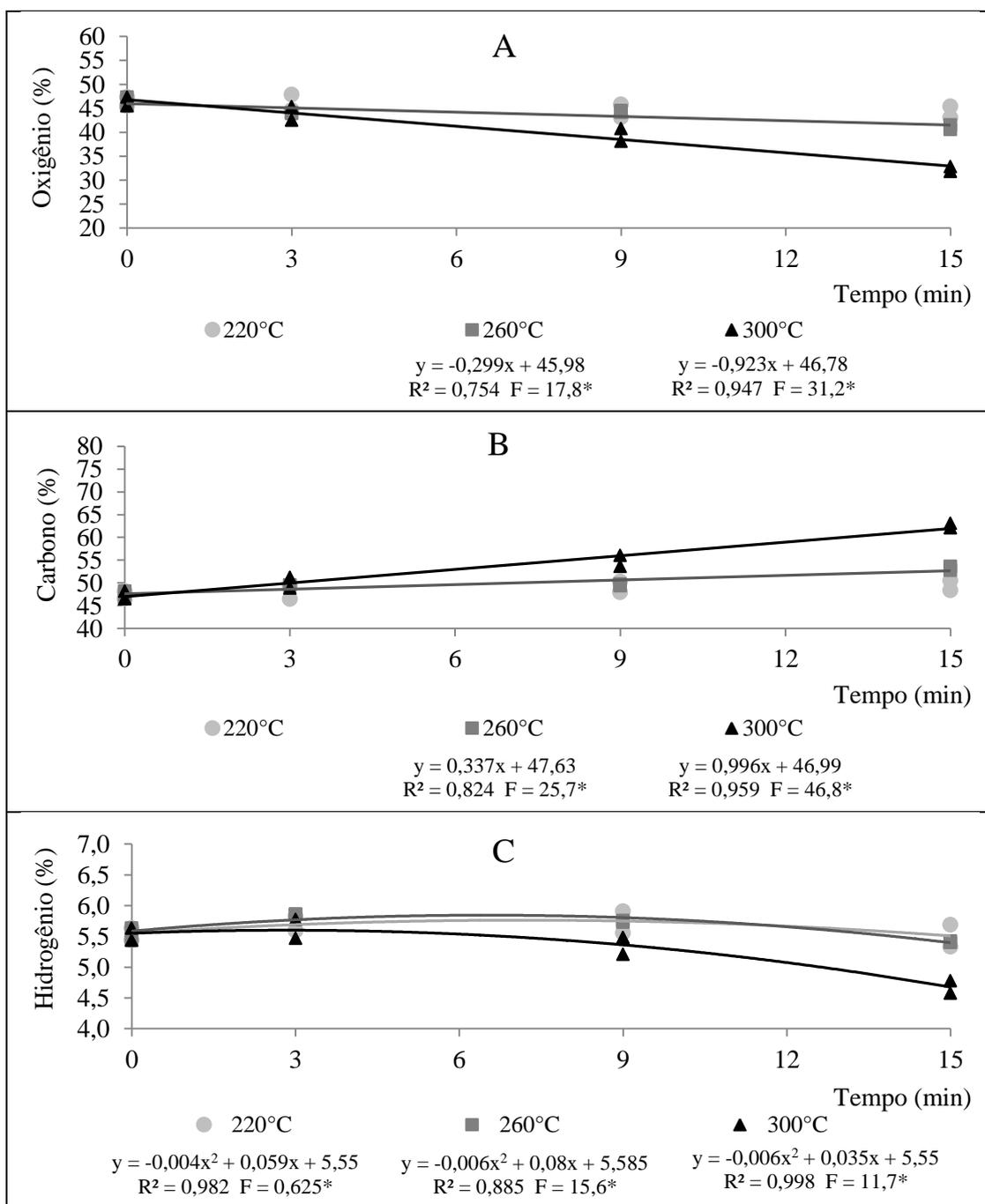


Figura 3 – Valores observados e estimados de oxigênio, carbono e hidrogênio elementares de cavacos torreficados de *Eucalyptus urophylla* em função do tempo para cada temperatura.

A exceção das equações para os teores de oxigênio e de carbono do tratamento a 220°C, todas as demais apresentaram ajustes significativos a 5% de significância. Assim com a composição química imediata, as equações com ajuste não significativos do 220°C ocorreram porque não houve alterações significativas com relação à testemunha, sendo a variância entre as repetições da análise maior que a variância entre as médias dos tratamentos.

Os teores de oxigênio (Figura 3A) apresentaram decréscimo em função do aumento do tempo de torrefação para as três temperaturas avaliadas. A tendência linear foi similar a apresentada pelos materiais voláteis, na qual os cavacos torreficados a 300°C apresentaram o maior R^2 da equação e redução mais acentuada em função do aumento do tempo de exposição. Os teores de carbono elementar (Figura 3B), assim como o carbono fixo, apresentaram tendência de aumento em função do tempo, sendo os maiores acréscimos e os maiores R^2 observados para o tratamento a 300°C. Os teores de hidrogênio apresentaram tendência polinomial quadrática, com aumento inicial, estabilização e posterior redução em função do aumento do tempo de aquecimento. O tratamento na temperatura de 300°C promoveu as maiores reduções nos teores de hidrogênio.

Conforme já discutido, o aumento tanto da temperatura quanto do tempo de torrefação resulta em maiores eliminações dos compostos voláteis presentes nos cavacos. Dentre esses voláteis, além do vapor d'água, incluem-se CO_2 , CO, ácido acético, metanol e outros compostos orgânicos (PRINS et al., 2006; POUDEL et al., 2015). Como a massa molecular do oxigênio é maior que a massa molecular do carbono, a sua eliminação junto aos compostos de baixa relação C/O reflete em perdas mássicas mais significativas. Por consequência, os teores de carbono tendem a aumentar seus percentuais na fração residual torreficada.

O hidrogênio segue a mesma tendência inicial de aumento, similar ao do carbono, já que a sua massa molecular é inferior a do oxigênio. A eliminação do hidrogênio através dos compostos voláteis, em termos percentuais resulta em perdas pouco significativas nos estágios iniciais da torrefação. Todavia, com o aumento do nível de degradação térmica, principalmente dos compostos hidroxílicos presentes na constituição da madeira, a perda mássica de hidrogênio torna-se significativa, reduzindo seus teores na fração sólida.

Diversos autores citam que a composição química elementar do combustível apresenta efeito relevante no seu conteúdo energético. Enquanto o carbono e o

hidrogênio contribuem para a maior liberação de energia durante a combustão do material, as cinzas (inorgânicos) são inertes e o oxigênio consome energia da reação (ROUSSETT et al., 2011; WANG et al., 2013; CHEN et al., 2014; POUDEL et al., 2015). Assim, a torrefação ao reduzir os teores de oxigênio e, conseqüentemente, aumentar os teores de carbono (Figura 3), possibilitou o incremento no poder calorífico dos cavacos submetidos a esse tratamento. Apesar de ter ocorrido o aumento dos teores de cinzas (Figura 2C) e a redução dos teores de hidrogênio, as alterações em valores percentuais são pequenas em relação à massa total de cavacos, sendo o efeito possivelmente pouco significativo no poder calorífico dos mesmos.

Na Figura 4 são apresentadas as relações entre os principais constituintes químicos dos cavacos torreficados e as suas respectivas equações ajustadas. A exceção das equações dos tratamentos realizados a 220°C, todas as demais apresentaram ajustes significativos. Os baixos R² das equações de 220°C refletem a tendência dos respectivos constituintes químicos, conforme as Figuras 3 e 4.

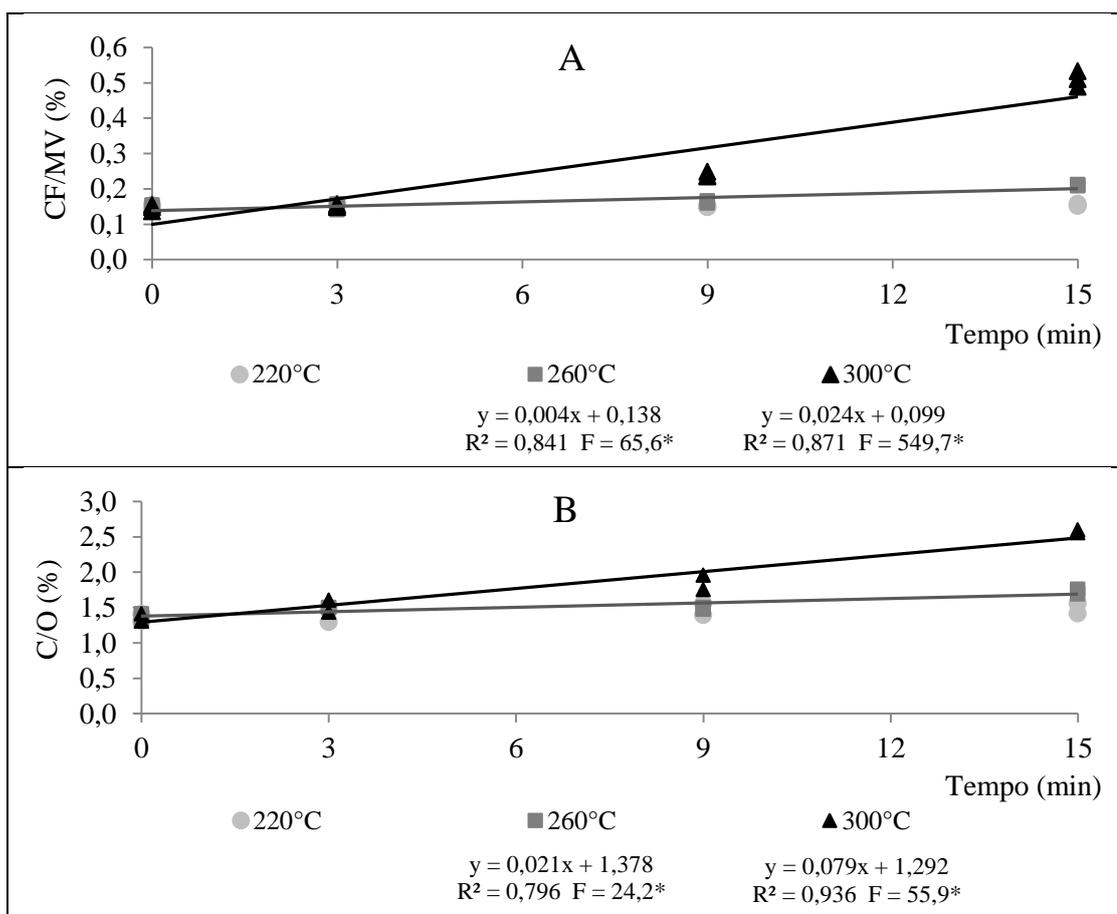


Figura 4 – Valores observados e estimados da relação carbono fixo / materiais voláteis (CF/MV) e da relação atômica carbono/oxigênio (C/O) de cavacos torreficados de *Eucalyptus urophylla* em função do tempo para cada temperatura.

Tanto a relação Carbono Fixo/Materiais Voláteis (Figura 4A) quanto a relação atômica Carbono/Oxigênio (Figura 4B) apresentaram tendência de aumento linear em função do aumento do tempo de torrefação nas três temperaturas avaliadas. Como apresentado nos dados de composição química, o aumento da temperatura e do tempo de torrefação promove um decréscimo nos teores de materiais voláteis e oxigênio e um conseqüente aumento nos teores de carbono fixo e elementar. Essas alterações químicas refletem nos maiores R^2 e nos maiores acréscimos observados para o tratamento a 300°C nas Figuras 4A e 4B.

O somatório dos teores de materiais voláteis e de carbono fixo perfaz a quase totalidade da massa seca dos cavacos, enquanto o somatório dos teores de carbono e oxigênio perfaz a maior fração da constituição elementar dos mesmos. Logo, as relações entre esses compostos são importantes parâmetros para se analisar de maneira rápida e confiável o potencial energético dos cavacos torreficados. O aumento das relações CF/MV e C/O através da torrefação indica o possível incremento energético dos cavacos submetidos ao tratamento.

Na Figura 5 são apresentados os valores observados e estimados das propriedades físicas de cavacos torreficados e suas respectivas equações. Todas as equações apresentaram ajustes significativos. Conforme apresentado na Figura 5A, a umidade de equilíbrio higroscópico dos cavacos teve tendência de redução com o aumento do tempo de torrefação, com os maiores decréscimos sendo observados para os cavacos torreficados a 300°C. Mesma tendência foi observada para o tamanho médio dos cavacos (Figura 5B), que reduziu em função do tempo de torrefação e de maneira mais acentuada para o tratamento realizado a 300°C. A densidade a granel (Figura 5C) apresentou tendência polinomial quadrática, com aumento inicial, estabilização e redução posterior em função do aumento do tempo de aquecimento, independente da temperatura de torrefação, sendo os cavacos torreficados a 300°C os menores valores de densidade a granel.

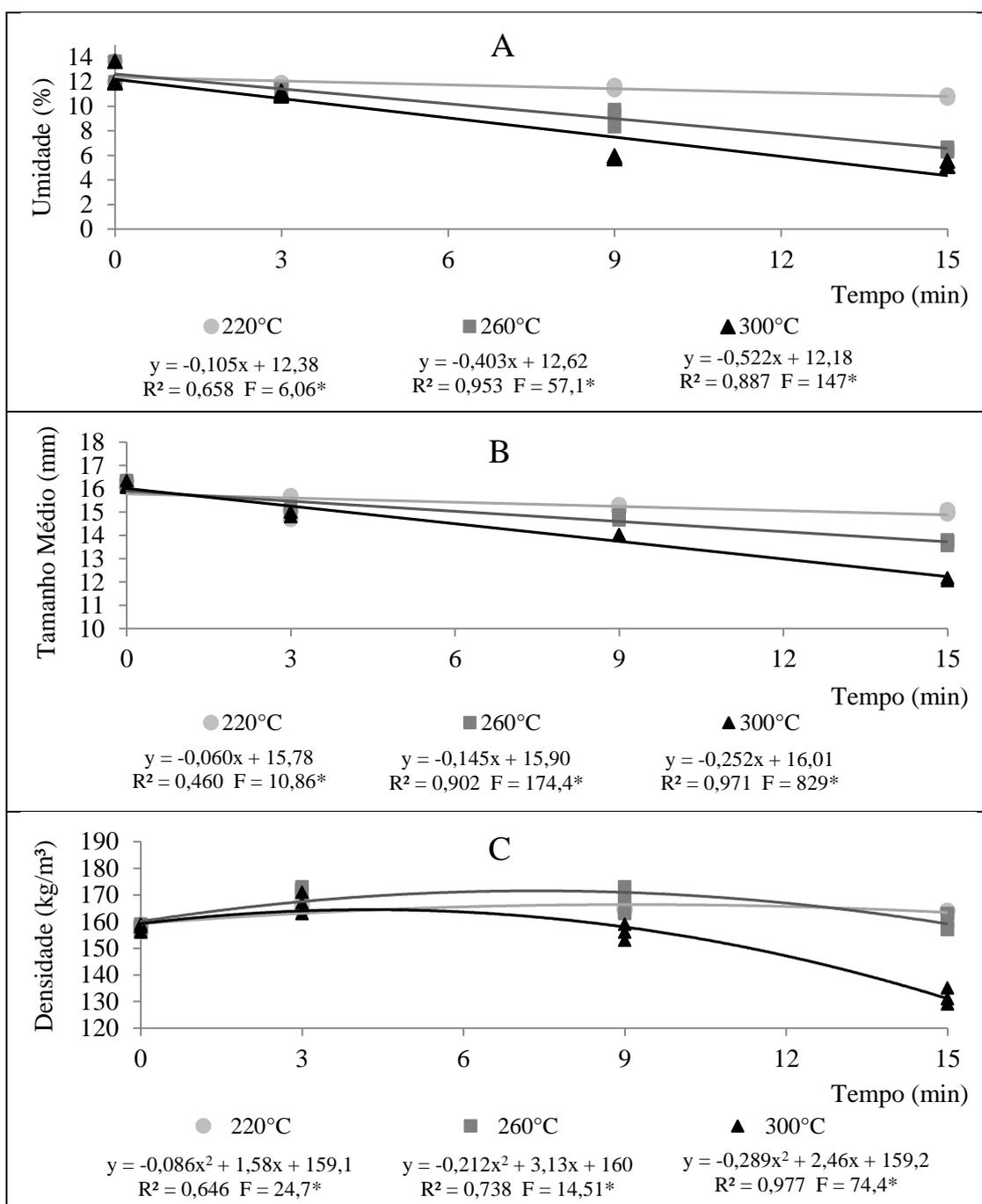


Figura 5 – Valores observados e estimados de umidade de equilíbrio higroscópico, tamanho médio e densidade a granel de cavacos torreficados de *Eucalyptus urophylla* em função do tempo para cada temperatura.

A redução da umidade de equilíbrio higroscópico indica a menor higroscopicidade dos cavacos torreficados com relação aos cavacos *in natura*. Essa redução se deve principalmente a degradação das hemiceluloses, que possuem maiores quantidades de grupos hidroxílicos disponíveis para adsorção de água, e ao aumento nos teores de ligninas que caracteristicamente são mais hidrofóbicas

(ACHARJEE et al., 2011). Altos valores de umidade da madeira são indesejáveis para o uso como combustível, pois durante a etapa inicial da combustão há um consumo maior de energia e tempo para sua eliminação (SWITHENBANK et al. 2011; BATES e GHONIEM, 2014). Assim, a redução da umidade por meio da torrefação contribui diretamente para aumentar o poder calorífico útil da madeira e aumentar a eficiência energética dos sistemas de queima.

O tamanho médio dos cavacos reduziu principalmente em função da retração volumétrica que ocorreu durante a etapa de secagem e, também, posteriormente, devido à degradação térmica da madeira, ocorrendo maior perda de massa em relação à contração volumétrica. Do ponto de vista tecnológico, a redução de tamanho facilita o processo de combustão devido a maior área superficial. Além disso, a torrefação promoveu inicialmente uma retração dos cavacos, reduzindo o volume antes do início das perdas significativas de massa, o que influenciou diretamente no aumento inicial da densidade a granel nas amostras torreficadas nas menores combinações de tempo e temperatura.

No entanto, observa-se para os tratamentos térmicos mais severos que a perda de massa reduziu consideravelmente a densidade a granel dos cavacos. Cabe salientar que densidades muito baixas são indesejáveis por diminuir eficiência e rendimento nas etapas de transporte, armazenamento e manuseio (HILL et al., 2013). Contudo, segundo os parâmetros da norma DIN EN 14961-4 (2011a), apenas os cavacos torreficados a 300°C por 15 minutos não atenderam os limites mínimos de qualidade exigidos em relação à densidade a granel que deve ser superior a 150 kg/m³.

Na Figura 6 são apresentados os valores observados e estimados das propriedades energéticas dos cavacos torreficados e as suas respectivas equações ajustadas. A exceção das equações para o PCS e PCU dos cavacos torreficados a 220°C, todas as demais equações apresentaram ajustes significativos a 5% de significância. As variâncias entre as repetições da análise do poder calorífico de cada tratamento de 220°C foram maiores que a variância entre as médias dos tratamentos, explicando assim os ajustes não significativos para essa temperatura.

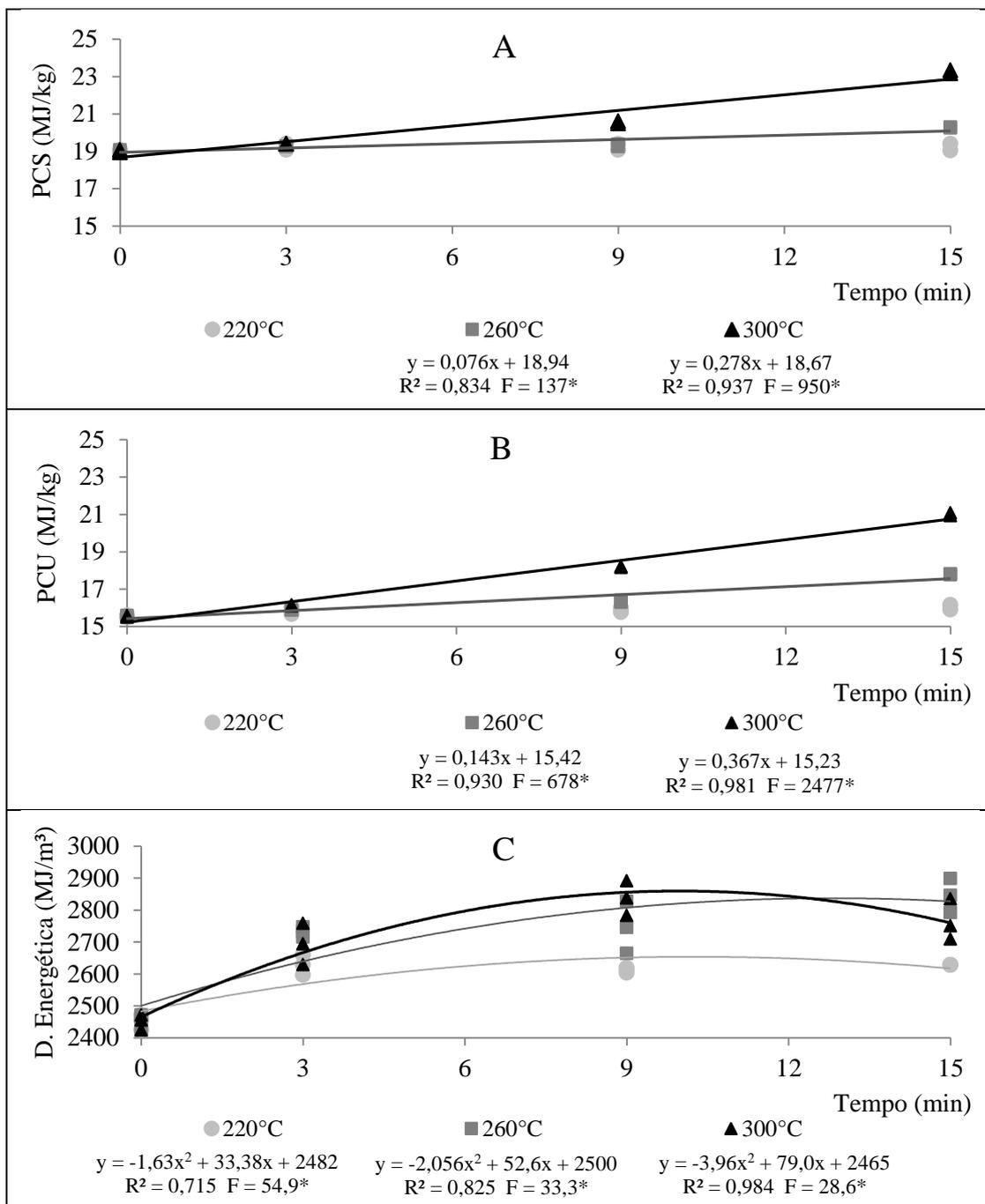


Figura 6 – Valores observados e estimados de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética de cavacos torreficados de *Eucalyptus urophylla* em função do tempo para cada temperatura.

Tanto o poder calorífico superior (Figura 6A) quanto o poder calorífico útil (Figura 6B) apresentaram tendência de aumento com a elevação da temperatura e do tempo de torrefação. Para ambos os índices, o tratamento a 300°C foi o que apresentou os maiores R² e as maiores aumentos, evidenciando o maior incremento em energia proporcionado nessa temperatura. Já a densidade energética (Figura 6B) apresentou tendência polinomial quadrática, de aumento inicial, estabilização e

posterior redução em função do tempo de torrefação em cada temperatura. As variações foram mais acentuadas no tratamento a 300°C, onde se observou uma redução da densidade energética entre os tempos de 9 e 15 minutos.

O PCS representa a quantidade máxima de energia que o combustível é capaz de liberar por unidade de massa anidra durante a combustão completa do mesmo. Conforme discutido na Figura 3, as alterações da composição química durante a torrefação influenciam diretamente no PCS do material. O valor médio de PCS dos cavacos aumentou em função do aumento da temperatura e do tempo de torrefação devido à concentração dos teores de carbono e a redução dos teores de oxigênio.

O PCU indica o potencial calorífico que o combustível apresenta nas condições de umidade de trabalho utilizadas, sendo considerado um melhor parâmetro do que o PCS para descrever o potencial energético dos cavacos torreficados. Observa-se que o incremento no PCU através da torrefação foi maior que do PCS. Essa diferença é devida a estimativa do PCU considerar também a redução nos teores de oxigênio e de umidade nos cavacos após o processo de torrefação.

A densidade energética é a quantidade teórica potencial de energia que o combustível apresenta por unidade de volume nas condições de umidade utilizada. A tendência polinomial quadrática da densidade energética dos cavacos seguiu a mesma tendência da densidade a granel (Figura 5C), por esta ser uma das variáveis utilizadas na sua estimativa. Contudo, o início da redução da densidade energética aconteceu apenas entre os tratamentos de 9 e 15 minutos na torrefação a 300°C. A redução tardia comparada a da densidade a granel se deve a tendência de aumento linear do PCU, a outra variável considerada na estimativa da densidade energética.

Fica evidenciado que para cada temperatura de torrefação existe um tempo ótimo de aquecimento, e vice-versa, onde os cavacos apresentam os valores máximos de densidade a granel e energética. A redução na densidade é indesejável para as etapas de transporte, armazenamento, manuseio e utilização final. Contudo, para algumas das principais destinações da biomassa torreficada, como matéria-prima para a produção de pellets e briquetes, gaseificação e queima em sistemas co-firing, primeiramente há a redução do material em partículas menores visando aumentar a eficiência e qualidade dos processos (VAN DER STELT et al., 2011). Logo, nesses casos específicos, a redução da densidade dos cavacos torreficados, a princípio, não é tão problemática.

De modo geral, observou-se para o potencial energético dos cavacos tende a aumentar com a torrefação, todavia é o necessário que o tratamento seja aplicado em uma combinação de temperatura e tempo suficiente para que as reações ocorram. Nas condições específicas deste estudo, os tratamentos aplicados na temperatura de 220°C para qualquer tempo e os tratamentos aplicados pelo tempo de 3 minutos para qualquer temperatura, não promoveram alterações significativas nas propriedades gerais dos cavacos. Evidencia-se, portanto, que nessas condições não há efetivamente a torrefação, mas apenas a secagem ou a pré-torrefação dos mesmos. Os tratamentos em combinações de maiores temperaturas e tempos são os que apresentaram os melhores incrementos no potencial energético dos cavacos.

4. CONCLUSÕES

De modo geral, conclui-se que a torrefação é um tratamento térmico capaz e eficaz de elevar o potencial energético dos cavacos de eucalipto, sendo que diferentes combinações de temperatura e tempo resultam em produtos com diferentes índices de qualidade entre si.

A torrefação dos cavacos apresenta tendência de redução na higroscopicidade, no tamanho médio e nos teores de materiais voláteis e de oxigênio elementar e de aumento nos teores de carbono fixo e elementar, de cinzas e no poder calorífico.

Os teores de hidrogênio, densidade a granel e densidade energética apresentam tendências polinomiais quadráticas de aumento inicial, estabilização e redução posterior em função do aumento do tempo de aquecimento nas condições de temperatura avaliadas.

O incremento na qualidade energética dos cavacos acontece de maneira mais efetiva nos tratamentos em temperaturas mais elevadas, particularmente a 300°C, em função do aumento do tempo de aquecimento.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 8112**: Carvão Vegetal – Análise Imediata. Rio de Janeiro. 1983.

ACHARJEE, T.C.; CORONELLA, C.J.; VASQUEZ, V.R. Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v.102, p.4849-4854, 2011.

ALMEIDA, G.; BRITO, J.O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology**, v.101, p.9778-9784, 2010.

BACH, Q. et al. Effects of wet torrefaction on reactivity and kinetics of wood under air combustion conditions. **Fuel**, v.137, p.375-383, 2014.

BATES, R.B.; GHONIEM, A.F. Modeling kinetics-transport interactions during biomass torrefaction: The effects of temperature, particle size, and moisture content. **Fuel**, v.137, P.216-229, 2014.

CHEN, Y. et al. Torrefaction of agriculture straws and its application on biomass pyrolysis poly-generation. **Bioresource Technology**, v.156, p.70-77, 2014.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG-DIN EN 14774-1: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method. Berlin: CEN, 2010a. 10 p.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG-EN 14918: Determination of calorific value. Berlin: CEN, 2010b. 63 p.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG-EN 15103: Determination of bulk density. Berlin: CEN, 2010c. 14 p.

DIN EN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG-EN 14961-4: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 4: Wood chips for non-industrial use. Berlin: CEN, 2011a. 15 p.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG-EN 15104: Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods. Berlin: CEN, 2011b. 15 p.

DU, S.; CHEN, W.; LUCAS, J.A. Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. **Bioresource Technology**, v.161, p-333-339, 2014.

ESTEVEZ, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, v.4(1), p.370-404, 2009.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S.; KUCUKBAYRAK, S. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v.91, p.759-764, 2010.

HILL, S.J.; GRIGSBY, W.J.; HALL, P.W. Chemical and cellulose crystallite changes in *Pinus radiata* during torrefaction. **Biomass and Bioenergy**, v.56, p.92-98, 2013.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (Brazilian Tree Industry). 80 f. 2015. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf>. Acesso em Janeiro de 2015.

PENG, J.H. et al. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, v.111, p.411-421, 2013.

PEREIRA, B.L.C. et al. Influence of Chemical Composition of *Eucalyptus* Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v.8(3), p.4574-4592, 2013.

POUDEL, J.; OHM, T.; OH, S.C. A study on torrefaction of food waste. **Fuel**, v.140, p.275-281, 2015.

PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G. More efficient biomass gasification via torrefaction. **Energy**, v.31, p.3458-3470, 2006.

ROUSSETT, P. et al. Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. **Bioresource Technology**, v.102, p.8225-8231, 2011.

SWITHENBANK, J.; CHEN, Q.; ZHANG, X.; SHARIFI, V.; POURKASHANIAN, M. Wood would burn. **Biomass and Bioenergy**, v.35(3), p.999-1007, 2011.

VAN DER STELT, M.J.C et al. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p.3748-3762, 2011.

WANG, C. et al. Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. **Bioresource Technology**, v.127, p.318-325, 2013.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v.86, p.1781-1788, 2007.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES GERAIS

- Os resultados do primeiro capítulo permitem concluir que o reator desenvolvido para torrefação em fluxo semi-contínuo é potencial e tecnicamente viável para o tratamento térmico de cavacos. Além disso, os rendimentos e balanços de massa e de energia tendem a diminuir em função do aumento do nível de torrefação.
- Os resultados do segundo capítulo permitem concluir que a temperatura final, o tempo de residência e a umidade inicial dos cavacos têm efeitos significativos no processo de torrefação. Além disso, permite concluir que a torrefação mais intensa promove uma concentração nos teores de lignina, um aumento da resistência à degradação térmica e uma redução na durabilidade mecânica dos cavacos submetidos ao tratamento.
- Os resultados do terceiro capítulo permitem concluir que cavacos torreficados de eucalipto apresentam maior potencial energético do que a sua matéria-prima *in natura*, com melhores índices de qualidade, tais como menor umidade de equilíbrio higroscópico e maiores teores de carbono e energia.
- Apesar dos possíveis custos relacionados à aplicação desse tratamento e as perdas de massa decorrentes da degradação térmica, a torrefação dos cavacos poder ser considerada uma alternativa interessante do ponto de vista comercial por viabilizar mercados ainda pouco acessíveis à madeira *in natura* e agregar valor ao produto, possibilitando alcançar maiores valores de comercialização.