

MATEUS ALVES DE MAGALHÃES

**TRATAMENTO TÉRMICO DE PARTÍCULAS E *PELLETS* DE MADEIRA EM
REATOR TIPO ROSCA SEM FIM**

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

M188t
2016

Magalhães, Mateus Alves de, 1991-
Tratamento térmico de partículas e *pellets* de madeira em reator tipo rosca sem fim / Mateus Alves de Magalhães. – Viçosa, MG, 2016.
vi, 55f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

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

1. Biomassa vegetal. 2. Energia - Fontes alternativas.
3. Madeira - Efeito da temperatura. 4. Torrefação. 5. Pellet.
6. Madeira com combustível. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 662.65

MATEUS ALVES DE MAGALHÃES

**TRATAMENTO TÉRMICO DE PARTÍCULAS E *PELLETS* DE MADEIRA EM
REATOR TIPO ROSCA SEM FIM**

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: 19 de fevereiro de 2016.

Marco Túlio Cardoso

Marcos Oliveira de Paula

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho

Benedito Rocha Vital
(Coorientador)

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meu caminho.

Aos meus pais, José e Maria; aos meus irmãos, Donizete, Elenice, Elizete e Marcos; aos meus cunhados, Vasconcelos, Pedro, Iolanda e Paula; aos meus sobrinhos, Lucas, Daniel, Davi, Felipe e Caio por todo carinho e incentivo nos estudos.

Aos meus amigos e familiares pelo apoio.

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

À Capes, pela concessão da bolsa de mestrado.

À Professora Angélica de Cassia Oliveira Carneiro, ao Professor Benedito Rocha Vital e à Professora Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, pela amizade, ensinamentos, oportunidades e pela confiança durante todos esses anos.

Ao Professor Marcos Oliveira de Paula e ao Doutor Marco Túlio Cardoso, pela amizade e contribuições.

Ao Professor Márcio Arêdes Martins, pela ajuda no desenvolvimento do reator.

Aos Professores Bárbara Luísa Corradi Pereira e Aylson Costa Oliveira, pelo companheirismo e pelos ensinamentos.

Ao Professor Paulo Fernando Trugilho e à mestranda Emylle Veloso Santos Costa, pela realização da análise termogravimétrica e elementar.

Ao funcionário Eder Cabral de Sousa, por se dedicar à construção, instalação e manutenção do reator e por toda ajuda nesse trabalho.

Ao secretário Francisco Ricardo Bizerra, pela disponibilidade e ajuda durante a realização do experimento.

Ao mestrando Carlos Miguel Simões da Silva, pela parceria no desenvolvimento do reator e pela ajuda durante o experimento.

Aos meus amigos do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, Welliton, Wagner, Matheus, Humberto, Braulio, Edna, Phaola, Emerson, Diego, Fernanda, Lívia, Reginaldo, Nívea, Emylle, Danilo, Fabiana, Larissa, Juliana, Deborah, Lawrence, Sálvio, Artur, Paulo, Bruno, Amélia, Clarissa, Lucas, Kauan, Jéssica, Ramon, Thaís, Laíssa, Leila, e Rafael, que contribuíram de alguma forma para o sucesso deste trabalho.

Ao Departamento de Zootecnia da UFV, pelo fornecimento e preparação da madeira, em especial aos funcionários Zé Mauro e Nataniel pela ajuda.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	2
CAPÍTULO I - DESEMPENHO DE UM REATOR TIPO ROSCA SEM FIM PARA TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA	3
1. INTRODUÇÃO	4
2. MATERIAL E MÉTODOS	6
2.1. Matéria-prima	6
2.2. Descrição do reator de torrefação	6
2.3. Desempenho do reator de torrefação	8
2.4. Caracterização das partículas de madeira	9
2.5. Delineamento experimental	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
3.1. Perfil térmico do reator	12
3.2. Perfil térmico da biomassa	15
3.3. Aspecto visual e análise de cor das partículas <i>in natura</i> e torrificadas	17
3.4. Caracterização da madeira	18
3.5. Rendimentos	20
4. CONCLUSÕES	22
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
CAPÍTULO II - EFEITO DA TORREFAÇÃO NA QUALIDADE DE PELLETS DE <i>Pinus sp.</i>	25
1. INTRODUÇÃO	26
2. MATERIAL E MÉTODOS	28
2.1. Matéria-prima	28
2.2. Produção dos <i>pellets</i>	28
2.3. Descrição do reator de torrefação	29
2.4. Propriedades dos <i>pellets</i>	31
2.5. Delineamento experimental	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1. Aspecto visual dos <i>pellets in natura</i> e torrificados	35
3.2. Caracterização química dos <i>pellets</i>	35

3.2.1. Análise termogravimétrica (TG/DTG).....	35
3.2.2. Composição química elementar	39
3.2.3. Composição química estrutural e imediata	40
3.3. Propriedades dos <i>pellets</i>	42
3.4. Norma de qualidade para <i>pellets</i>	49
4. CONCLUSÕES	51
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
CONCLUSÕES GERAIS.....	55

RESUMO

MAGALHÃES, Mateus Alves de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2016. **Tratamento térmico de partículas e pellets de madeira em reator tipo rosca sem fim**. Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientador: Benedito Rocha Vital.

A torrefação e densificação da biomassa permitem melhorar suas propriedades energéticas e aumentar sua competitividade frente aos combustíveis fósseis. Considerando a importância do desenvolvimento de tecnologias e processos para obtenção de uma biomassa energética e competitiva, desenvolveu-se o presente trabalho, dividido em dois capítulos. O Capítulo I teve como objetivo avaliar o desempenho de um reator tipo rosca sem fim na torrefação de partículas de madeira e o efeito do tempo e temperatura de torrefação em suas propriedades. Para a torrefação, foi utilizada madeira de *Pinus* sp. sem casca, previamente transformada em partículas e secas a 0% de umidade. As partículas foram torrificadas em um reator tipo rosca sem fim nas temperaturas de 210, 250 e 290 °C e nos tempos de residência de 3, 6 e 9 minutos. Foram avaliados o desempenho do reator e as propriedades energéticas das partículas de madeira torrificada. Os resultados das partículas torrificadas foram comparados com a madeira *in natura*. Conclui-se que o reator é viável tecnicamente para torrefação das partículas de madeira em curtos tempos de residência, com obtenção de madeira torrificada com alto rendimento energético e com melhores propriedades energéticas. O Capítulo II teve como objetivo avaliar o efeito do tempo e temperatura de torrefação nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de *pellets* de *Pinus* sp., e verificar a adequação dos resultados obtidos com a norma de comercialização europeia. Foram produzidos *pellets* com partículas a 16% de umidade em base seca. Posteriormente, os *pellets* foram secos a 0% de umidade e submetidos à torrefação nas temperaturas de 210, 250 e 290 °C e nos tempos de residência de 10, 20 e 30 minutos. Foram determinadas as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos *pellets* torrificados e *in natura*. Os resultados foram comparados com a norma de comercialização europeia. Conclui-se que o tratamento térmico promoveu a redução da umidade de equilíbrio higroscópico, aumento do poder calorífico, da estabilidade térmica, da durabilidade mecânica e, principalmente, aumento da densidade energética. Os *pellets* torrificados apresentaram resultados satisfatórios e se enquadraram à norma de comercialização, exceto quanto à durabilidade.

ABSTRACT

MAGALHÃES, Mateus Alves de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016. **Heat treatment of wood particles and pellets in screw type reactor**. Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-Advisor: Benedito Rocha Vital.

Torrefaction and densification of biomass help to improve their energy properties and increase its competitiveness against fossil fuels. Considering the importance of developing technologies and processes to obtain an energetic and competitive biomass, this study was developed, divided into two chapters. The Chapter I aimed to evaluate the performance of a screw type reactor on the torrefaction of wood particles and the effect of the time and temperature of the torrefaction on their properties. For torrefaction, it was used *Pinus* sp. wood without bark, previously transformed into particles and dried at 0% moisture. The particles were torrefied in a screw type reactor at temperatures of 210, 250 and 290 °C and residence times of 3, 6 and 9 minutes. Were evaluated the reactor performance and energetic properties of torrefied wood particles. The results of torrefied particles were compared with the wood raw. It follows that the reactor is technically feasible for torrefaction of wood particles at short residence times, obtaining torrefied wood with high energy yield and better energy properties. The Chapter II had as objective evaluate the effect of the time and temperature of the torrefaction in the physical, chemical and mechanical properties of *Pinus* sp *pellets*, and verify the adequacy of the obtained results with the European marketing standard. Were produced *pellets* with particles at 16% moisture on a dry basis. Subsequently, the *pellets* were dried to 0% moisture and subjected to torrefaction at temperatures of 210, 250 and 290 °C and residence times of 10, 20 and 30 minutes. Were determined the physical, chemical and mechanical properties of the *pellets*, torrefied and raw. The results were compared with the European marketing standard. It follows that the heat treatment caused a reduction of hygroscopic equilibrium moisture content, increased of the calorific value, thermal stability, mechanical durability and, mainly, increased of the energy density. The torrefied *pellets* showed satisfactory results and were in accordance with marketing standard, except for durability.

INTRODUÇÃO GERAL

Na busca de novas fontes energéticas que sejam competitivas frente aos atuais combustíveis utilizados, muito tem se falado na chamada biomassa moderna, obtida a partir de processos industriais que aumentam o conteúdo energético das fontes de biomassa convencionais. Os principais tipos são os *pellets*, briquetes e a biomassa submetida ao processo térmico, denominado de torrefação. Essa biomassa pode ser obtida de diversas fontes, sejam elas agrícolas, florestais ou industriais, que, por sua vez, podem ser de culturas energéticas ou de resíduos das diversas atividades (MARAVER, 2013).

Os *pellets* e briquetes são a biomassa submetida à compactação, formando, assim, um combustível de alta densidade energética, o que possibilita o transporte a maiores distâncias e otimiza o armazenamento. Ao longo do desenvolvimento da biomassa compactada, os briquetes antecedem os *pellets*. Estes últimos foram criados em função da demanda por um novo tipo de combustível compactado, que possibilitasse a utilização em equipamentos de queima mais modernos e que viabilizasse a logística de transporte da biomassa a grandes distâncias.

O processo de torrefação da biomassa se assemelha a uma pirólise lenta, na qual o material é submetido à determinada temperatura com restrição de oxigênio, para que seja eliminada parte dos compostos voláteis e que, dessa forma, aumente o conteúdo de carbono, além de aumentar seu poder calorífico e provocar alterações físicas. Pode-se dizer que a torrefação se encontra entre a secagem e a pirólise da biomassa, sendo dessa forma um processo mais rápido que este último (KOPPEJAN et al., 2012).

Tanto a peletização quanto a torrefação visam aumentar a densidade energética da biomassa e gerar um combustível mais homogêneo, com menor umidade e que permita a utilização em equipamentos de queima modernos, aumentando sua eficiência.

Sendo assim, a dissertação foi dividida em dois capítulos, conforme apresentados a seguir:

- **Capítulo I:** Desempenho de um reator tipo rosca sem fim para tratamento térmico da madeira.
- **Capítulo II:** Efeito da torrefação na qualidade de *pellets* de *Pinus* sp..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KOPPEJAN, J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S.; MADRALI, S. **IEA Bioenergy Task 32 report: Status overview of torrefaction technologies**. Enschede, p.61. 2012.

MARAVÉ, A. G. **Optimización del proceso de pelletización de residuos agrícolas procedentes del olivar para su aplicación en calderas domésticas** 2013. 275 f. Tese (Doctorado en Ingeniería Civil y Arquitectura) - Universidad de Granada España, 2013.

CAPÍTULO I

DESEMPENHO DE UM REATOR TIPO ROSCA SEM FIM PARA TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA

RESUMO - A madeira destinada à geração de energia, em sua maioria, apresenta características indesejáveis, como baixo poder calorífico superior e alta umidade, o que reduz seu valor comercial e dificulta seu uso. A torrefação permite melhorar parte destas características, tornando a madeira um combustível mais competitivo frente às fontes energéticas atuais. O objetivo principal deste estudo foi avaliar o desempenho de um reator tipo rosca sem fim, bem como o efeito do tempo e temperatura na torrefação de partículas da madeira. A madeira *Pinus* sp. foi previamente transformada em partículas e classificada em peneiras de 0,5 e 3 milímetros, em seguida foram secas a 0% de umidade e submetidas à torrefação nas temperaturas de 210, 250 e 290 °C e nos tempos de residência de 3, 6 e 9 minutos. As temperaturas de torrefação foram monitoradas e coletadas com o auxílio de termopares. O desempenho do reator foi avaliado por meio do rendimento em massa e em energia, perfil térmico da parte de torrefação, perfil térmico e taxa de aquecimento da biomassa. A qualificação energética da madeira foi feita por meio da umidade de equilíbrio higroscópico, densidade a granel, poder calorífico superior, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Conclui-se que o reator é viável tecnicamente para torrefação de partículas de madeira em curtos tempos de residência, sendo necessárias apenas algumas melhorias para a otimização do processo de torrefação. Conclui-se também que a torrefação, em curtos tempos de residência, promove a obtenção de madeira torrificada com alto rendimento energético e promove o aumento da densidade energética, importante parâmetro a ser considerado quando a madeira se destina ao uso energético.

Palavras-chave: Torrefação; Madeira Torrificada; Densidade Energética.

1. INTRODUÇÃO

A torrefação pode ser definida como uma pirólise parcial da biomassa em ambiente com restrição de oxigênio. O processo ocorre entre 200 e 300 °C, sob pressão atmosférica e por curtos tempos de residência, se comparado à pirólise para produção de carvão. Na torrefação da biomassa, obtém-se material torreficado de cor amarronzada à escura, gases condensáveis ricos em ácidos orgânicos e gases não condensáveis compostos principalmente por CO e CO₂ (BERGMAN et al., 2005; NHUCHHEN et al., 2014).

Diferentemente da pirólise convencional, na torrefação, o rendimento em massa é superior, sendo seu principal objetivo reduzir os componentes de baixo poder calorífico que estão presentes na biomassa e, assim, preservar grande parte de sua energia. De modo geral, para uma redução em massa da ordem de 20%, ocorre um decréscimo de 10% no conteúdo energético da biomassa (KOPPEJAN et al., 2012).

A biomassa sofre várias mudanças durante a torrefação, tais como: redução da higroscopicidade, pela degradação das hemiceluloses e, conseqüentemente, dos grupos hidroxílicos responsáveis por tal propriedade (LI et al., 2012); aumento do poder calorífico superior, em função da degradação de compostos menos energéticos; aumento relativo do teor de lignina, em função da degradação da celulose, hemiceluloses e extrativos (NHUCHHEN et al., 2014); redução da resistência mecânica, em função da degradação parcial de ligações químicas presentes na estrutura da biomassa *in natura* (PHANPHANICH; MANI, 2011); e, aumento da densidade energética, em função do aumento do poder calorífico útil (PENG et al., 2013). A biomassa torreficada apresenta propriedades competitivas frente aos combustíveis fósseis e pode ser empregada em processos de conversão térmica, como a gaseificação e cogeração, ou mesmo na conversão, em briquetes e *pellets* (VAN DER STELT et al., 2011).

A torrefação pode ser dividida em quatro etapas básicas. A primeira compreende a secagem, sendo retirada apenas a água livre presente na biomassa; na segunda, é removida a água de constituição presente nas ligações e também alguns hidrocarbonetos; na terceira, ocorre a torrefação propriamente dita com a liberação de parte dos compostos voláteis; e, na quarta, ocorre o resfriamento à temperatura ambiente do material torreficado (NHUCHHEN et al., 2014).

Logo, os sistemas para torrefação da biomassa devem contemplar essas quatro etapas, sendo desejável que os mesmos sejam compactos, de baixo custo e consumo de energia, produtivos e que gerem materiais torreficados homogêneos.

A torrefação pode ser realizada em diversos tipos de reatores, sendo os principais modelos disponíveis no mercado dos tipos: tambor rotativo, rosca sem fim, múltiplos fornos, leito fluidizado, micro-ondas e correia transportadora oscilante (KLEINSCHMIDT, 2011). Independente do sistema, o processo é influenciado, principalmente, pela temperatura de torrefação, tempo de residência no reator, granulometria e umidade da biomassa (NHUCHHEN et al., 2014).

Apesar da simplicidade do processo de torrefação, os reatores disponíveis no mercado, em sua maioria, apresentam alto custo, grandes dimensões e baixa velocidade de torrefação e produtividade. Portanto, na busca de alternativas para minimizar esses problemas e tornar o processo mais competitivo, melhorias na troca de calor entre a biomassa a ser torreficada e o gás quente tornam-se uma opção interessante. Dessa forma, modificações no sistema de troca de calor por meio do uso de aletas podem ser uma alternativa para aumentar a eficiência de troca e reduzir os problemas supracitados.

Diante do exposto, os objetivos desta pesquisa foram: avaliar o desempenho de um reator tipo rosca sem fim, com o emprego de aletas, na torrefação de partículas de madeira; e, avaliar o efeito do tempo e temperatura de torrefação nas propriedades físicas e químicas das partículas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), vinculado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), localizado no município de Viçosa, Minas Gerais.

2.1. Matéria-prima

Foi utilizada, como matéria-prima, a madeira de *Pinus* sp. com idade aproximada de 20 anos, obtida a partir de um plantio florestal pertencente ao Departamento de Zootecnia da UFV.

A madeira foi previamente transformada em maravalha utilizando uma plaina e, posteriormente, seca ao ar livre, até atingir teor de umidade de, aproximadamente, 20% para moagem em moinho martelo e produção de partículas. As partículas foram classificadas em peneiras sobrepostas, recolhendo-se a fração que passou pela peneira de 3 milímetros (mm) e ficou retida na de 0,5 mm.

2.2. Descrição do reator de torrefação

Para a torrefação da madeira, inicialmente, as partículas foram secas em estufa a 103 ± 2 °C até 0% de umidade para eliminar a influência da água sobre os tratamentos. Foram utilizados aproximadamente 5 kg de partículas para cada tratamento térmico.

Foram utilizadas três temperaturas (210, 250 e 290 °C) e três tempos de residência (3, 6 e 9 minutos) no processo de torrefação, definidos de acordo com testes preliminares.

Para a torrefação da madeira, utilizou-se um reator tipo rosca sem fim, desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira. O reator consiste de quatro componentes básicos, sendo o sistema de transporte de biomassa, de aquecimento, de resfriamento e de exaustão dos gases (Figura 1).

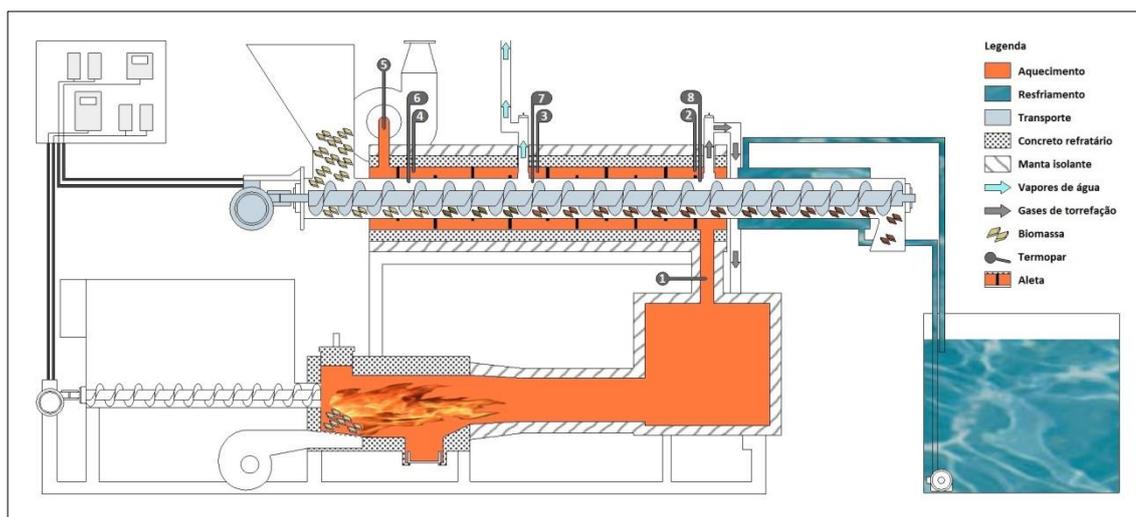


Figura 1 - Esquema do sistema de torrefação de biomassa

O sistema de transporte consiste de uma rosca sem fim, acionada por um motoredutor, que conduz a biomassa por meio de uma tubulação metálica do silo de alimentação, passando pelos estágios de aquecimento e resfriamento até a saída do reator.

O sistema de aquecimento é composto por um queimador pirolítico de biomassa, que fornece gás quente para uma “camisa” que reveste a secção de torrefação. A torrefação ocorre de forma indireta, por meio da troca de calor entre o gás de aquecimento e a tubulação metálica (que apresenta uma série de aletas responsáveis por aumentar a área de troca), e desta com a biomassa.

O sistema de resfriamento, localizado ao final da etapa de aquecimento é baseado no arrefecimento da sua tubulação, por meio de troca indireta de calor com a água em circulação constante. Para tanto, utilizou-se uma minibomba submersa que faz a água circular de um reservatório para a “camisa” que reveste a secção de resfriamento, e desta para o reservatório, permitindo o reaproveitamento da água por meio de um circuito fechado.

O sistema de exaustão dos gases é composto de duas etapas, sendo a primeira referente à retirada do gás de aquecimento advindo do queimador pirolítico, retirado com auxílio de um exaustor elétrico, localizado na extremidade oposta à entrada desse gás. E a segunda, referente à retirada dos vapores d’água e materiais voláteis produzidos durante o tratamento térmico, sendo a exaustão realizada por efeito “chaminé”, por meio de duas saídas situadas ao longo da secção de torrefação.

Para realizar o controle do tempo de residência do material no reator, utilizou-se dois temporizadores analógicos que controlaram o motoredutor. Um dos temporizadores atua acionando o motoredutor por aproximadamente 4 segundos (tempo necessário para

uma volta completa da rosca sem fim), e o outro atua desligando o motoredutor por um tempo pré-determinado. A soma desses dois tempos multiplicada pelo número de voltas da rosca sem fim na secção de torrefação definiu o tempo de residência para o tratamento térmico da madeira.

A temperatura da secção de torrefação foi monitorada por meio de um termômetro digital de marca *Gulton* e modelo *Gulterm 700-10S*, utilizando oito termopares tipo J.

2.3. Desempenho do reator de torrefação

O desempenho do reator foi avaliado por meio do rendimento em massa e energia, perfil térmico do gás de aquecimento, perfil térmico e taxa de aquecimento das partículas de madeira. Ademais, foi determinado, para cada tratamento, o tempo mínimo em que as partículas atingiram 200 °C, a qual é considerada como temperatura na qual a torrefação se inicia (BASU, 2013).

O rendimento em massa de cada tratamento foi obtido dividindo-se a massa final de partículas de madeira torrificada pela massa inicial de partículas de madeira *in natura*, multiplicado por 100, conforme a equação abaixo. A perda de massa foi obtida pela diferença entre 100 e o rendimento em massa.

$$RM = \frac{MF_{mt}}{MI_m} \times 100$$

Sendo,

RM: rendimento em massa, em %;

MF_{mt}: massa final de partículas de madeira torrificada, em kg;

MI_m: massa inicial de partículas de madeira *in natura*, em kg.

O rendimento em energia de cada tratamento foi obtido dividindo-se o poder calorífico superior (PCS) das partículas de madeira torrificada pelo valor médio do PCS das partículas de madeira *in natura*, multiplicado pelo rendimento em massa, conforme a equação abaixo:

$$RE = \frac{PCS_{mt}}{PCS_m} \times RM$$

Sendo,

RE: rendimento em energia, em %;

PCS_{mt}: poder calorífico superior das partículas de madeira torrificada, em kcal/kg;

PCS_m: poder calorífico superior das partículas de madeira *in natura*, em kcal/kg;

RM: rendimento em massa, em %.

O perfil térmico do gás de aquecimento foi obtido pela interpolação das temperaturas coletadas nos termopares 1, 2, 3, 4 e 5, e das partículas de madeira, pela interpolação das temperaturas coletadas nos termopares 6, 7 e 8 (Figura 1).

A taxa de aquecimento de cada tratamento foi calculada a partir das temperaturas coletadas nos termopares 6, 7 e 8, conforme a equação abaixo:

$$TA = \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta T_{po}}$$

Sendo,

TA: taxa de aquecimento, em °C/minuto;

T_n: temperatura no termopar número *n*, em °C;

T_{n+1}: temperatura no termopar número *n+1*, em °C;

ΔT_{po}: tempo de transporte das partículas de madeira entre os termopares *n* e *n+1*, em minutos.

2.4. Caracterização das partículas de madeira

A determinação do teor de umidade da madeira, em base seca, foi feita de acordo com a norma EN 14774-2 (DIN, 2009).

Para a determinação da umidade de equilíbrio higroscópico da madeira, amostras foram colocadas em uma câmara climática a 20 °C e 65% de umidade relativa até atingirem massa constante.

A densidade a granel (kg/m³) da madeira foi obtida de acordo com a norma EN 15103 (DIN, 2010b), em amostras condicionadas a 65% de umidade relativa e 20 °C de temperatura.

Para determinação do poder calorífico superior e composição química imediata, as amostras foram preparadas de acordo com a norma TAPPI 257 cm-85 (TAPPI, 1985).

A composição química imediata foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), para as determinações de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo, em base seca.

O poder calorífico superior foi obtido de acordo com a norma da EN 14918 (DIN, 2010a), utilizando uma bomba calorimétrica adiabática *IKA300*[®].

A análise colorimétrica foi realizada pela mensuração da claridade (*L*), a coordenada vermelho-verde (*a**) e a coordenada azul-amarelo (*b**), utilizando um espectrofotômetro *Konica Minolta CM-2500D*. Posteriormente, os parâmetros *L*, *a* e *b* foram convertidos para o padrão RGB e, assim, foi estimada a cor das partículas de madeira.

2.5. Delineamento experimental

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com nove tratamentos (três temperaturas e três tempos) e três repetições, totalizando 27 unidades amostrais, mais três unidades amostrais referentes à testemunha (biomassa não torrificada), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Delineamento experimental

Identificação do Tratamento	Temperatura	Tempo
	°C	Minutos
Testemunha	-	-
1	210	3
2	210	6
3	210	9
4	250	3
5	250	6
6	250	9
7	290	3
8	290	6
9	290	9

As médias das propriedades da madeira dentro de cada tratamento foram submetidas aos testes de *Lilliefors*, para testar a normalidade, e *Cochran*, para testar a homogeneidade das variâncias. Os resultados foram submetidos à análise de variância

(ANOVA) e quando estabelecidas diferenças significativas entre os tratamentos, aplicou-se o teste *Tukey* para os tratamentos a 5% de significância.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa *STATISTICA 8.0* (STATSOFT, 2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Perfil térmico do reator

O perfil térmico para o reator tipo rosca sem fim foi obtido para os diferentes tempos e temperaturas de torrefação a partir da interpolação das temperaturas registradas pelos termopares 1, 2, 3, 4 e 5. Na Figura 2, é apresentado o perfil térmico do reator em função dos tratamentos.

Analisando a Figura 2, observa-se, nos mapas térmicos, uma distribuição gradual da temperatura no reator, evidenciando as zonas de secagem, torrefação e fonte de calor para o sistema.

Nos tratamentos realizados a 250 e 290 °C, as partículas foram submetidas a temperaturas iniciais superiores a 120 e 132 °C, respectivamente, conforme evidenciado nas Figuras 2D a 2F e 2G a 2I, respectivamente. Para as partículas torrificadas a 210 °C, a máxima temperatura inicial registrada foi de 97 °C (Figura 2C). De modo geral, com o aumento da temperatura do tratamento, observou-se uma maior temperatura inicial, o que promoveu o aumento da taxa de aquecimento da biomassa, antecipando a degradação térmica e, conseqüentemente, a perda de massa.

De acordo com as temperaturas observadas na primeira metade da região de torrefação, é possível que ocorra principalmente a secagem da biomassa, podendo iniciar uma pré-torrefação para os maiores tempos de residência.

As biomassas torrificadas a 250 e 290 °C alcançam temperaturas superiores a 200 °C na região central. Segundo Basu (2013), a partir deste ponto, inicia-se a degradação térmica mais pronunciada, pois, até atingir essa temperatura, a madeira, de modo geral, apresenta-se estável termicamente, tendo perdas de massas eventuais pela presença de extrativos voláteis. Verifica-se que a temperatura máxima na região central para as biomassas torrificadas a 210 °C foi em torno de 160 °C, ocorrendo basicamente a secagem da mesma. Neste sentido, os tratamentos realizados a 210 °C seriam mais indicados para a secagem da biomassa por apresentarem baixo gasto energético, devendo apenas estabelecer um tempo ótimo para cada biomassa e teor de umidade inicial.

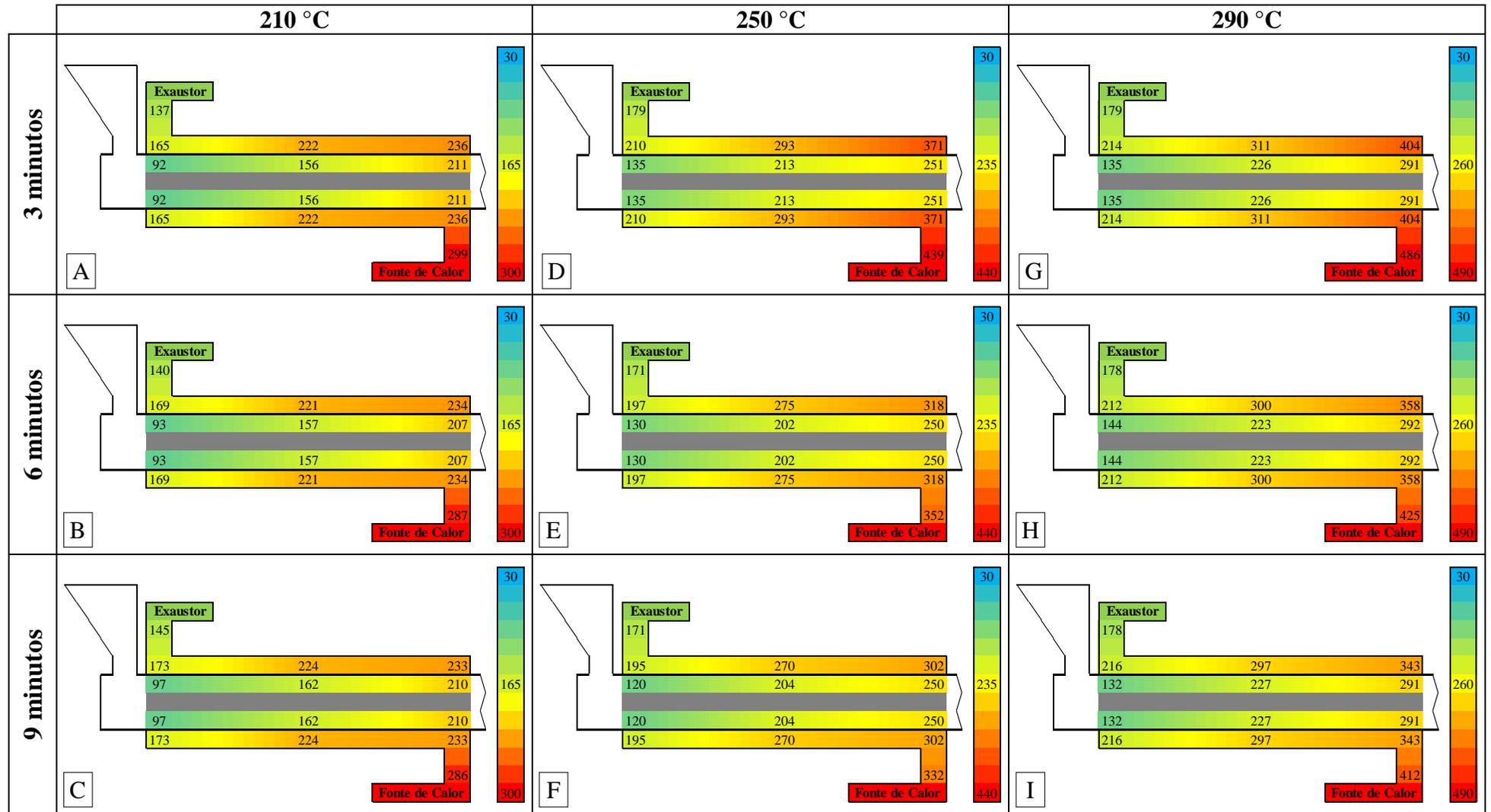


Figura 2 - Mapas térmicos do processo de torrefação das partículas em reator tipo rosca sem fim em função dos tratamentos

O tempo de residência da biomassa no reator tem grande influência sobre a operação e produtividade do equipamento e também na qualidade do produto final. Características de cada tipo de biomassa como granulometria, densidade e umidade têm efeito direto no tempo de residência a ser utilizado na torrefação, que, por sua vez, está intimamente associado à taxa de transferência de calor. Assim, o tipo de biomassa e o tempo de residência são variáveis inter-relacionadas e dependentes no processo de torrefação.

Verificou-se que os maiores tempos de residência permitiram maior transferência de calor entre o reator e as partículas de biomassa nas diferentes zonas de torrefação, o que proporcionou maior estabilidade do reator durante sua operação. Além disso, obteve-se um produto mais homogêneo.

O menor tempo de residência representa a maior velocidade de transporte, sendo observado um maior fluxo de calor junto à passagem da biomassa. Dessa forma, observou-se uma maior demanda de temperatura no gás de aquecimento e menor eficiência de troca de calor entre a biomassa e o equipamento de torrefação, principalmente, para as temperaturas de 250 e 290 °C.

Ademais, como observado na Figura 2, maiores tempos de torrefação demandam menores temperaturas dos gases de aquecimento, o que contribui para preservação das partes metálicas do equipamento e reduz o gasto de combustível para fornecimento de calor para o sistema.

De modo geral, verificou ser possível estabelecer, com base nas temperaturas observadas no reator, um tempo mínimo de residência para que haja uma efetiva torrefação, devendo estes ser determinados para que se otimize o processo, reduzindo o gasto energético e melhorando a qualidade do produto final.

Ainda na Figura 2, observa-se que as temperaturas do gás de aquecimento, na saída do reator, foram em média 141, 173 e 178 °C para as partículas torrificadas a 210, 250 e 290 °C, respectivamente. Verificou-se uma grande perda térmica, devido ao déficit de troca de calor pelo equipamento de torrefação, sugerindo o seu redimensionamento para o melhor aproveitamento do calor. Essas temperaturas de saída dos gases sugerem também que o redimensionamento seja feito em função da temperatura de torrefação, pois o equipamento apresenta diferentes comportamentos nas diferentes temperaturas avaliadas.

3.2. Perfil térmico da biomassa

Na Figura 3, são apresentadas as curvas de temperatura para as partículas, em função do tempo de residência.

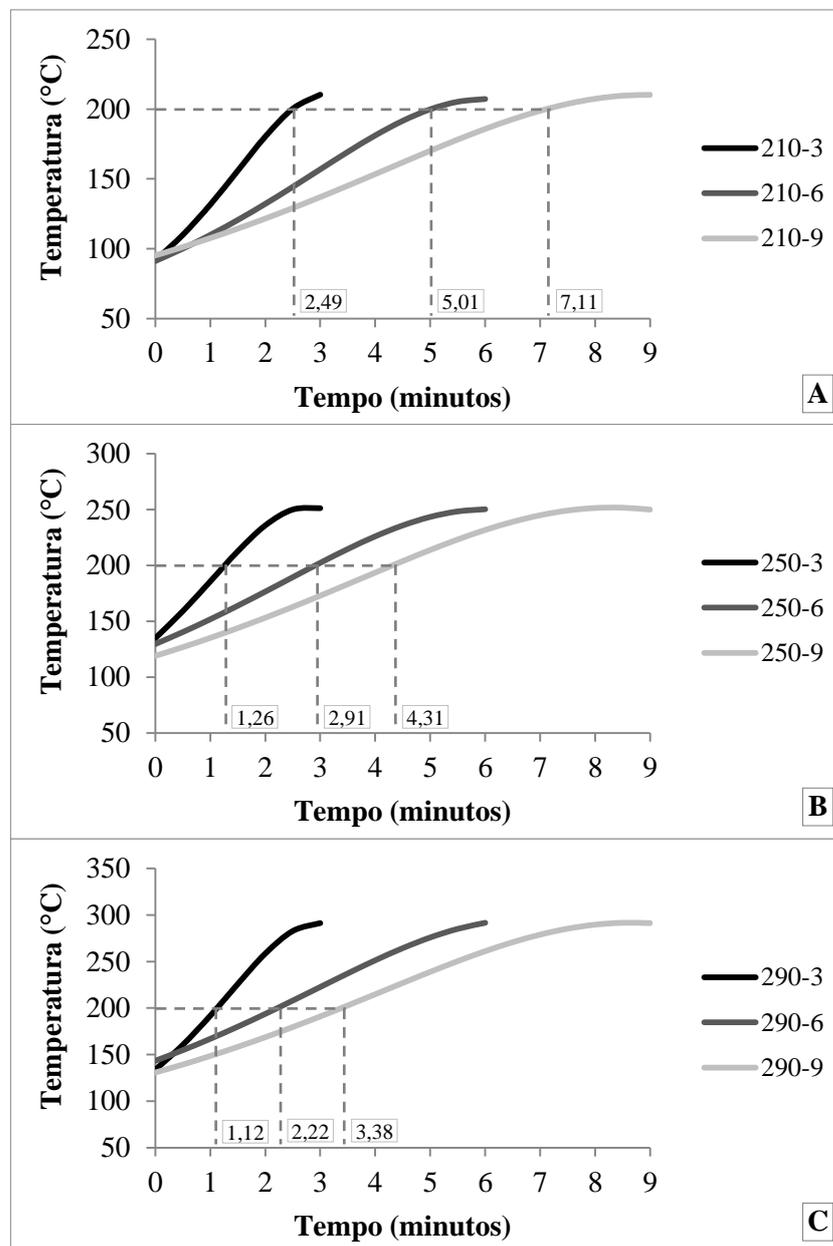


Figura 3 - Curvas de temperatura das partículas para os tratamentos a 210 °C (A), 250 °C (B) e 290 °C (C), em função do tempo de residência (linhas pontilhadas correspondem ao tempo necessário para as partículas alcançarem 200 °C)

Observando a Figura 3, nos tratamentos realizados a 210 °C, as partículas gastaram, em média, 81,8% do tempo para atingir a temperatura de 200 °C, na qual se iniciam as reações de torrefação. Logo, o tempo de permanência das partículas acima desta temperatura foi insuficiente para degradar, de forma significativa, a madeira.

Em um estudo de decomposição térmica realizado por Pereira (2012), foi observado que a madeira é muito estável a temperaturas inferiores a 200 °C, ocorrendo pequenas perdas de massa. Abaixo desta temperatura, ocorre apenas a eliminação de alguns extrativos, aumento das ligações de hidrogênio e algumas alterações na estrutura vítrea da lignina, ocasionando, principalmente, a redução da umidade de equilíbrio da madeira (NHUCHHEN et al., 2014).

Em contrapartida, em maiores temperaturas e tempos de residência, as partículas permanecem acima de 200 °C por um maior tempo, promovendo uma degradação térmica mais acentuada, como pode ser observado quando analisamos os rendimentos em massa (Tabela 5, item 3.5).

Na literatura, são citados tempos de residência superiores aos utilizados no presente estudo, podendo ser de vários minutos até poucas horas (NHUCHHEN et al., 2014). Os menores tempos utilizados, neste trabalho, foram em função da maior eficiência de troca térmica obtida por meio do uso de aletas que aumentam o tempo de residência do gás de aquecimento.

Na Tabela 2, são apresentadas as taxas de aquecimento para intervalos de tempo de torrefação em função dos tratamentos.

Tabela 2 - Taxa de aquecimento (°C/min) para intervalos de tempo de torrefação das partículas em função dos tratamentos

Tratamento	Intervalos de Torrefação (minutos)								
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
1 (210-3)	40	49	30						
2 (210-6)	19	22	25	24	19	7			
3 (210-9)	12	14	15	16	17	16	13	9	3
4 (250-3)	51	50	15						
5 (250-6)	22	25	26	24	17	7			
6 (250-9)	16	18	20	21	20	18	13	6	0
7 (290-3)	58	67	33						
8 (290-6)	24	27	29	29	25	16			
9 (290-9)	18	20	22	24	24	22	18	11	2

Valores entre parênteses indicam temperatura e tempo de torrefação, respectivamente.

Observa-se, na Tabela 2, o aumento da taxa de aquecimento até 50% do tempo total de residência. No restante do tempo total de residência, observou-se uma redução da taxa de aquecimento em função da tendência de equilíbrio entre a temperatura da biomassa e do reator.

As maiores taxas de aquecimento obtidas nos menores tempos de residência não apresentaram efeito significativo sobre a torrefação da madeira. Como mencionado, o tempo de permanência das partículas em temperaturas nas quais ocorre a torrefação propriamente dita foi insuficiente para promover a degradação térmica.

Nos maiores tempos de residência, observa-se uma menor variação da taxa de aquecimento, o que pode justificar a maior homogeneidade das partículas torreficadas, como pode ser visto na Figura 4.

3.3. Aspecto visual e análise de cor das partículas *in natura* e torreficadas

Na Figura 4, são apresentadas as fotos das partículas em função dos tratamentos térmicos, bem como para a testemunha.

		3 min	6 min	9 min
TESTEMUNHA 	210°C			
	250°C			
	290°C			

Figura 4 - Aspecto visual das partículas torreficadas em função dos tratamentos

Observa-se, na Figura 4, que o aumento da temperatura ou tempo do tratamento térmico promove o escurecimento das partículas, podendo este aspecto visual estar relacionado como o grau de torrefação, consequentemente, associado com a degradação dos constituintes químicos da madeira.

Na Tabela 3, são apresentados os valores médios dos parâmetros *L*, *a* e *b* da análise de cor e a estimativa da cor com base nesses parâmetros.

Tabela 3 - Parâmetros da análise de cor e cor estimada para as partículas em função dos tratamentos

Tratamento	L	a	b	Cor Estimada
<i>Testemunha</i>	74,4 a	8,2 e	25,1 c	
1 (210-3)	71,7 b	9,0 de	28,1 ab	
2 (210-6)	69,5 c	10,0 c	28,5 a	
3 (210-9)	64,4 d	10,1 bc	27,2 b	
4 (250-3)	63,5 d	9,7 cd	25,2 c	
5 (250-6)	53,8 e	11,0 ab	23,6 d	
6 (250-9)	48,2 f	11,2 a	21,9 e	
7 (290-3)	55,1 e	9,7 cd	22,6 de	
8 (290-6)	40,4 g	10,3 abc	18,7 f	
9 (290-9)	34,2 h	10,2 bc	16,8 g	

Valores entre parênteses indicam temperatura e tempo de torrefação, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si a 5% de significância pelo teste *Tukey*.

Observa-se, na Tabela 3, uma diferença significativa dos parâmetros *L*, *a* e *b* para os tratamentos, assim como na cor estimada, principalmente, para maiores tempos e temperaturas de torrefação.

Na prática, a medição dos parâmetros de cor subsidia a tomada de decisão em tempo real no processo de torrefação, pois permite avaliar o grau de torrefação e estimar determinadas propriedades do material torreficado sem depender de análises demoradas.

3.4. Caracterização da madeira

Na Tabela 4, são apresentados os valores médios das propriedades físicas e químicas das partículas de pinus.

Tabela 4 - Características da madeira de pinus *in natura* e torrificada

Tratamento	UEH _{bs}	DG	MV	CF	CZ	PCS
	%	kg/m ³	%	%	%	MJ/kg
<i>Testemunha</i>	12,0 a	148,5 g	86,9 a	13,0 e	0,08 c	20,0 c
1 (210-3)	11,7 ab	149,0 g	86,8 a	13,1 de	0,10 c	20,1 c
2 (210-6)	11,5 ab	155,2 de	85,0 b	14,9 c	0,10 c	20,3 c
3 (210-9)	11,9 ab	156,8 cd	84,4 bc	15,5 bc	0,12 bc	20,4 c
4 (250-3)	11,7 ab	153,6 ef	85,9 ab	14,0 cde	0,07 c	20,3 c
5 (250-6)	11,2 ab	154,1 ef	84,7 bc	15,2 bc	0,10 c	20,5 bc
6 (250-9)	11,2 bc	158,5 bc	84,6 bc	15,3 bc	0,10 c	20,5 bc
7 (290-3)	11,6 ab	151,8 f	85,1 b	14,8 cd	0,12 bc	20,6 bc
8 (290-6)	10,3 d	161,1 ab	83,2 cd	16,6 ab	0,19 a	21,0 ab
9 (290-9)	10,4 cd	163,1 a	82,6 d	17,2 a	0,18 ab	21,2 a

UEH_{bs} = umidade de equilíbrio higroscópico em base seca; DG = densidade a granel; MV = materiais voláteis; CF = carbono fixo; CZ = cinzas; PCS = poder calorífico superior.

Valores entre parênteses indicam temperatura e tempo de torrefação, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si a 5% de significância pelo teste *Tukey*.

A umidade de equilíbrio higroscópico das partículas de madeira reduziu com o aumento do tempo ou da temperatura de torrefação. Ao se comparar as partículas *in natura* com as torrificadas a 290 °C por 9 minutos, a umidade reduziu em 12,72%, ocasionada pela eliminação de parte dos compostos químicos presentes na madeira, que são mais hidrofílicos, como as hemiceluloses. Esses componentes apresentam grande número de grupos (-OH) livres, que, na madeira *in natura*, são responsáveis pela adsorção de água, com conseqüente aumento do teor de umidade. Por outro lado, principalmente, a lignina que se apresenta com um componente hidrofóbico é preservada durante a torrefação (PEREIRA, 2014).

Uma menor umidade de equilíbrio é desejável, por aumentar o poder calorífico útil da biomassa, uma vez que a água contida no material contribui de forma negativa no momento da combustão. Outro fato interessante é a diminuição da possibilidade de ataque de microrganismos decompositores da madeira quando ela fica armazenada por longos períodos de tempo (TUMULURU et al., 2011).

Observa-se um aumento da densidade a granel das partículas com o aumento da temperatura e tempo de torrefação, tendo o tratamento mais severo (290 °C e 9 minutos) um acréscimo de 9,81% em comparação com a testemunha. Esse aumento se deve à redução do tamanho das partículas durante o tratamento térmico, considerando que a perda de massa foi inferior à contração volumétrica (PHANPHANICH; MANI, 2011).

A maior densidade a granel contribui de forma positiva para o aumento da densidade energética, nas atividades de movimentação e no armazenamento da biomassa, reduzindo custos e possibilitando o aumento da distância ótima de transporte.

Observa-se um aumento do poder calorífico superior com o incremento da temperatura ou tempo de torrefação. Em comparação com a testemunha, o tratamento a 290 °C e 9 minutos apresentou um acréscimo no poder calorífico superior de 5,71%, que pode ser atribuído ao aumento do teor de carbono fixo das partículas.

O poder calorífico superior é uma das principais propriedades na seleção da biomassa para o uso energético, auxiliando também no dimensionamento dos equipamentos de empreendimento energéticos, desde a parte de campo até as instalações industriais. A madeira destinada ao uso energético deve conter o maior poder calorífico possível para que na combustão possa liberar maior quantidade de energia. A torrefação vem incrementar o poder calorífico de forma significativa, mostrando-se como uma alternativa viável para melhorias energéticas na biomassa (NHUCHHEN et al., 2014).

Ainda na Tabela 4, observa-se a redução do teor de materiais voláteis, aumento do teor de cinzas e carbono fixo, com o acréscimo da temperatura ou tempo de torrefação das partículas. A redução do teor de materiais voláteis se deve a eliminação de componentes menos estáveis termicamente, como as hemiceluloses, na forma de gases condensáveis e não condensáveis. O aumento do teor de cinzas é característico do processo de degradação térmica em baixas temperaturas, pois ocorre em função da degradação dos componentes orgânicos menos estáveis. O aumento do teor de carbono fixo se deve, principalmente, à contribuição da lignina dada sua maior estabilidade térmica e composição com alto teor de carbono (PEREIRA, 2012).

É sempre desejável madeira com maior teor de carbono fixo, por este fornecer maior quantidade de energia durante a combustão e menor teor de cinzas que geram resíduos, causando incrustações nos equipamentos de queima e tubulações.

3.5. Rendimentos

Na Tabela 5, são apresentados os valores médios de rendimento e perda de massa em função dos tratamentos térmicos.

Tabela 5 - Rendimentos e perda de massa para as partículas torrificadas

Tratamento	Rendimento em Massa	Perda de Massa	Rendimento em Energia
	%	%	%
1 (210-3)	99,6	0,4	99,8
2 (210-6)	99,7	0,3	100,0
3 (210-9)	99,8	0,2	100,0
4 (250-3)	98,2	1,8	99,3
5 (250-6)	98,0	2,0	100,0
6 (250-9)	96,8	3,2	99,1
7 (290-3)	97,8	2,2	100,0
8 (290-6)	95,3	4,7	100,0
9 (290-9)	93,0	7,0	98,3

Valores entre parênteses indicam temperatura e tempo de torrefação, respectivamente.

Observa-se que o rendimento em massa decresce com o aumento da temperatura ou tempo de torrefação, o que é esperado, uma vez que o tratamento térmico promove a perda de massa, sendo observada, sobretudo, nos tratamentos mais intensos, devido a degradação, principalmente, das hemiceluloses. Cabe salientar que esses componentes pouco contribuem para o rendimento em energia. A massa resultante da torrefação da madeira é composta, na sua maioria, dependendo da intensidade do tratamento térmico, por celulose e lignina, sendo esta última uma macromolécula que apresenta estrutura rica em carbono e o principal responsável pelo rendimento da torrefação (NHUCHHEN et al., 2014).

A torrefação por curtos períodos de tempo, como avaliada no presente estudo, não promoveu perda de massa significativa nas partículas de pinus em relação à testemunha. As partículas torrificadas a 290 °C e 9 minutos apresentaram maior degradação, com valor médio de 7,0% de perda de massa.

Na maioria dos tratamentos, não foi observada redução no rendimento em energia, mesmo ocorrendo perdas de massa, podendo ser justificado pelo aumento do poder calorífico superior das partículas torrificadas.

Observa-se ainda, a redução do rendimento em energia nos tratamentos de maior tempo ou temperatura, porém, como é conhecida, essa redução é inferior ao decréscimo do rendimento em massa. O tratamento térmico elimina parte dos constituintes menos energéticos presentes na biomassa que pouco contribuem para o poder calorífico superior.

4. CONCLUSÕES

A torrefação por curtos períodos de tempo, como avaliada no presente estudo, promoveu:

- ✓ Uma significativa perda de massa, principalmente, no tratamento 290 °C e 9 minutos;
- ✓ A obtenção de madeira torrificada com alto rendimento energético;
- ✓ Aumento da densidade a granel, redução da umidade de equilíbrio higroscópico e aumento do poder calorífico superior, que, em conjunto, irão contribuir para o aumento da densidade energética, importante parâmetro a ser considerado quando a madeira se destina ao uso energético.

O reator se mostrou viável tecnicamente para torrefação da madeira por curtos períodos de tempo, sendo necessário o aumento do número de aletas para promover uma maior troca de calor, conseqüentemente, a melhoria da eficiência do processo de torrefação.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: Análise química imediata do carvão vegetal**. Rio de Janeiro,: 8 p. 1986.

BASU, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. **Academic Press**, 2013.

BERGMAN, P. C. A.; BOERSMA, A. R.; KIEL, J. H. A.; PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass **ECN Biomass**, v. 05, n. 067, p. 50, 2005.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **EN 14774-2: Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method**. Alemanha: CEN: 9 p. 2009.

_____. **EN 14918: Determination of calorific value**. Belim: CEN: 63 p. 2010a.

_____. **EN 15103: Solid biofuels - Determination of bulk density**. Alemanha: CEN: 14 p. 2010b.

KLEINSCHMIDT, C. P. **Overview of international developments in torrefaction**. Austria, p.9. 2011.

KOPPEJAN, J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S.; MADRALI, S. **IEA Bioenergy Task 32 report: Status overview of torrefaction technologies**. Enschede, p.61. 2012.

LI, H.; LIU, X.; LEGROS, R.; BI, X. T.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor. **Bioresource Technology**, v. 103, n. 1, p. 453-458, 2012.

NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, v. 2014, p. 56, 2014.

PENG, J. H.; BI, X. T.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C. J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, v. 111, p. 411-421, 2013.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de eucalyptus para a produção de carvão vegetal**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PEREIRA, B. L. C. **Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico**. 2014. 73 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 1246-1253, 2011.

REPELLIN, V.; GOVIN, A.; ROLLAND, M.; GUYONNET, R. Modelling anhydrous weight loss of wood chips during torrefaction in a pilot kiln. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, p. 602-609, 2010.

STATSOFT, I. N. C. **Statistica data analysis software system version 8.0**. Tulsa, USA 2007.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 257 cm-85: Sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta: TAPPI. 1985.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3748-3762, 2011.

CAPÍTULO II

EFEITO DA TORREFAÇÃO NA QUALIDADE DE *PELLETS* DE *Pinus* sp.

RESUMO - A torrefação pós-peletização é uma das rotas utilizadas na obtenção de *pellets* torrificados de madeira com alta densidade energética e se apresenta como uma boa estratégia por envolver menor custo global. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do tempo e temperatura de torrefação nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de *pellets* de *Pinus* sp. e verificar a adequação dos resultados obtidos para os *pellets* com a norma de comercialização. A madeira foi previamente transformada em partículas e seca a 16% de umidade para posterior peletização. Para a torrefação, os *pellets* foram secos a 0% de umidade e submetidos ao tratamento térmico nas temperaturas de 210, 250 e 290 °C e nos tempos de residência de 10, 20 e 30 minutos. Foram determinadas as propriedades físicas, químicas e mecânicas e os resultados obtidos foram comparados com a norma de comercialização europeia. Conclui-se que a torrefação pós-peletização promove diversas melhorias nas propriedades dos *pellets*, dentre elas, destaca-se o incremento da densidade energética e um ligeiro aumento de suas propriedades mecânicas. Todos os tratamentos apresentaram resultados satisfatórios e se enquadraram à norma de comercialização, exceto quanto à durabilidade. O tratamento realizado a 250 °C e 30 minutos mostrou-se como melhor opção para torrefação de *pellets* de *Pinus* sp.

Palavras-chave: *Pellets* Torrificados; Umidade; Densidade a Granel.

1. INTRODUÇÃO

Os *pellets* são um tipo de combustível granulado obtido a partir da compactação da biomassa em uma prensa peletizadora. Sua principal aplicação é na geração de energia térmica para o aquecimento de residências ou para utilização em processos industriais. A peletização promove melhorias significativas na biomassa, tornando-a um combustível mais homogêneo, reduzindo o seu volume e, conseqüentemente, otimizando seu armazenamento e transporte (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009; SHAW et al., 2009; WARAJANONT; SOPONPONGPIPAT, 2013).

Pellets de boa qualidade devem apresentar tamanho uniforme, baixo teor de umidade, baixo teor de cinzas, alta densidade a granel e alto poder calorífico, pois tais características aumentam a eficiência e durabilidade dos sistemas de combustão, bem como a melhor conversão da biomassa em energia, justificando seu uso em sistemas de queima modernos, que se destinam à geração tanto de calor para processos industriais quanto de eletricidade. Assim como as propriedades físicas e químicas, a resistência mecânica deve ser alta a fim de garantir que os *pellets* mantenham sua integridade no momento do transporte, armazenamento, operações de carregamento ou descarregamento e uso.

De modo geral, os *pellets* mantêm algumas das características da biomassa que lhes deu origem, como baixo poder calorífico em relação aos combustíveis não renováveis e a alta umidade de equilíbrio higroscópico, propriedades que contribuem negativamente para a geração térmica, além de reduzir consideravelmente a resistência mecânica dos mesmos, no que tange a umidade.

Para minimizar esses problemas, há a alternativa da torrefação, que tem, como principais conseqüências, o aumento do poder calorífico superior e a redução da umidade de equilíbrio higroscópico, devido à degradação de compostos menos energéticos e mais hidrofílicos contidos na biomassa (NHUCHHEN et al., 2014). Além disso, a redução da umidade evita que os *pellets* percam resistência devido à adsorção de moléculas de água entre as partículas.

Cabe salientar que existem duas possíveis rotas para obter os *pellets* torreficados. A primeira seria torreficar as partículas e, posteriormente, produzir os *pellets*. A segunda seria produzir os *pellets* e, depois, submetê-los à torrefação (GHIASI et al., 2014). A primeira rota é a mais utilizada e consolidada por empresas que trabalham com os *pellets* torreficados. A segunda rota pode ser considerada como a mais difícil, por

necessitar de *pellets* com alta resistência mecânica para que suportem o processo de torrefação sem se desintegrar e gerar finos, considerando que os equipamentos para tal processo mantêm a biomassa em constante movimentação.

A torrefação pós-produção dos *pellets* é uma boa estratégia para obtenção de *pellets* torreficados por envolver menor custo global. Nessa rota, é dispensável o condicionamento com vapor para facilitar a peletização e adição de ligantes para aumentar da resistência mecânica dos *pellets*. Ademais, é mais eficiente energeticamente, quando comparada a rota de peletização pós-torrefação convencional (GHIASI et al., 2014).

Neste sentido, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito da torrefação de *pellets* de *Pinus* sp. em um reator em rosca sem fim. Os objetivos específicos foram: avaliar o efeito do tempo e temperatura de torrefação nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos *pellets*; e, verificar a adequação das propriedades dos *pellets* com a norma de comercialização europeia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), vinculado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), localizado no município de Viçosa, Minas Gerais.

2.1. Matéria-prima

Foi utilizada como matéria-prima a madeira de *Pinus* sp. com idade aproximada de 20 anos, obtida a partir de um plantio florestal pertencente ao Departamento de Zootecnia da UFV.

A madeira foi previamente transformada em maravalha utilizando uma plaina. Depois, a madeira foi seca ao ar livre até atingir a umidade de aproximadamente 20% para posterior moagem em moinho de martelo. As partículas foram classificadas em peneiras sobrepostas, recolhendo-se a fração que passou pela peneira de 3 mm e ficou retida na de 0,5 mm.

2.2. Produção dos pellets

As partículas foram secas em estufa de circulação forçada a 103 ± 2 °C até atingirem aproximadamente 16% de umidade em base seca.

Os pellets foram produzidos em uma prensa peletizadora laboratorial da marca *Amandus Kahl*, modelo 14-175 com capacidade para produção de $30 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ (Figura 1). A matriz de peletização possui orifícios com comprimento de 30,0 mm e diâmetro de 7,5 mm na entrada e 6,3 mm na saída, a faca que define o tamanho dos pellets está a 20 mm da matriz.

A temperatura média de peletização variou em torno de 106 °C. Para atingir essa temperatura em menor tempo, a matriz de peletização foi pré-aquecida em óleo a 200°C por, aproximadamente, 30 minutos para posterior montagem na prensa, minimizando o uso de partículas para o aquecimento.

Para alimentação da peletizadora, utilizou-se um sistema composto por um motoredutor, um controlador de velocidade e uma rosca sem fim. Para produção de pellets com melhores propriedades mecânicas foram instalados, ao longo da rosca sem fim, quatro bicos de injeção de vapor produzido por uma autoclave (Figura 1).

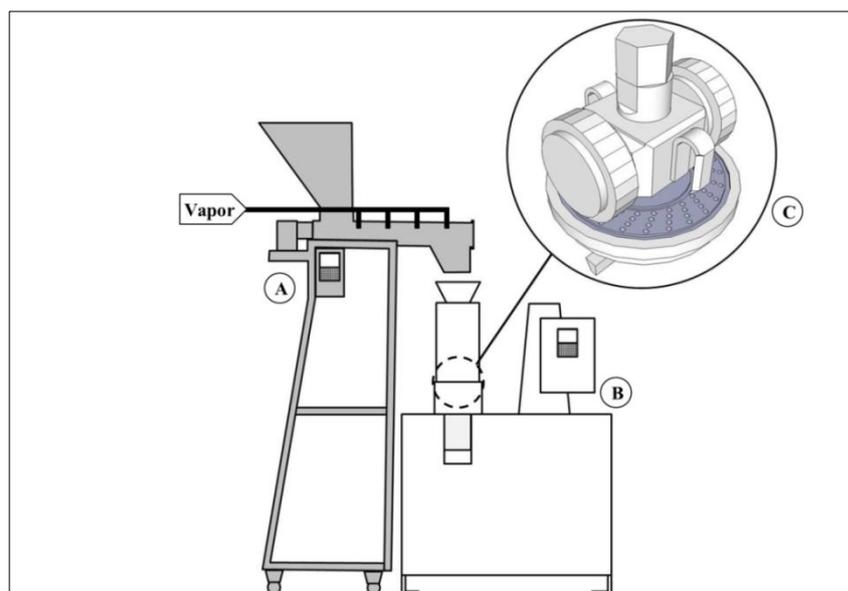


Figura 1 - Esquema do sistema de alimentação com injeção de vapor (A), peletizadora *Amandus Kahl*, modelo 14-175 (B) e matriz de peletização com rolos de compactação (C)

2.3. Descrição do reator de torrefação

Para a torrefação dos *pellets*, inicialmente, os mesmos foram secos a 0% de umidade para eliminar a influência do teor de água sobre os tratamentos. Foram utilizados, aproximadamente, 5 kg de *pellets* para cada tratamento térmico.

Foram utilizadas três temperaturas (210, 250 e 290 °C) e três tempos de residência (10, 20 e 30 minutos) no processo de torrefação, definidos de acordo com testes preliminares realizados.

Para a torrefação dos *pellets*, utilizou-se um reator tipo rosca sem fim desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira. O reator consiste de quatro componentes básicos, sendo o sistema de transporte de *pellets*, de aquecimento, de resfriamento e de exaustão dos gases (Figura 2).

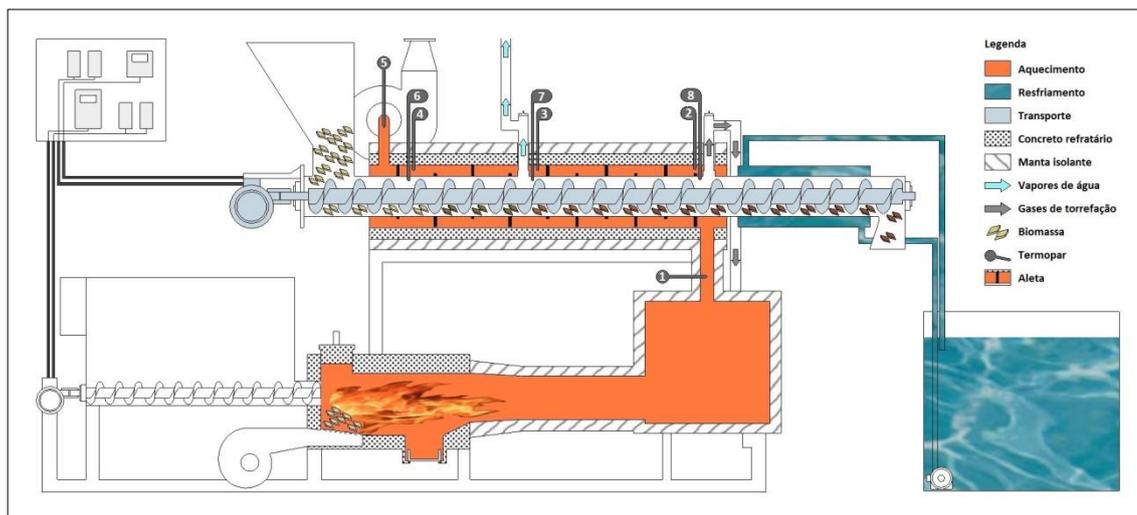


Figura 2 - Esquema do sistema de torrefação de biomassa

O sistema de transporte consiste de uma rosca sem fim, acionada por um motoredutor, que conduz a biomassa por meio de uma tubulação metálica do silo de alimentação, passando pelos estágios de aquecimento e resfriamento até a saída do reator.

O sistema de aquecimento é composto por um queimador pirolítico de biomassa que fornece gás quente para uma “camisa” que reveste a secção de torrefação. A torrefação ocorre de forma indireta, por meio da troca de calor entre o gás de aquecimento e a tubulação metálica (que apresenta uma série de aletas responsáveis por aumentar a área de troca), e desta com a biomassa.

O sistema de resfriamento, localizado ao final da etapa de aquecimento é baseado no arrefecimento da sua tubulação, por meio de troca indireta de calor com a água em circulação constante. Para tanto, utilizou-se uma minibomba submersa que faz a água circular de um reservatório para a “camisa” que reveste a secção de resfriamento, e desta para o reservatório, permitindo o reaproveitamento da água por meio de um circuito fechado.

O sistema de exaustão dos gases é composto de duas etapas, sendo a primeira referente à retirada do gás de aquecimento advindo do queimador pirolítico, retirado com auxílio de um exaustor elétrico, localizado na extremidade oposta à entrada desse gás. E a segunda, referente à retirada dos vapores d’água e materiais voláteis produzidos durante o tratamento térmico, sendo a exaustão realizada por efeito “chaminé”, por meio de duas saídas situadas ao longo da secção de torrefação.

Para realizar o controle do tempo de residência do material no reator, utilizou-se dois temporizadores analógicos que controlaram o motoredutor. Um dos temporizadores atua acionando o motoredutor por aproximadamente 4 segundos (tempo necessário para

uma volta completa da rosca sem fim), e o outro atua desligando o motoredutor por um tempo pré-determinado. A soma desses dois tempos multiplicada pelo número de voltas da rosca sem fim na secção de torrefação definiu o tempo de residência para o tratamento térmico dos *pellets*.

A temperatura da secção de torrefação foi monitorada por meio de um termômetro digital de marca *Gulton* e modelo *Gulterm 700-10S*, utilizando oito termopares tipo J.

2.4. Propriedades dos *pellets*

Após a torrefação, os *pellets* foram climatizados em câmara climática com temperatura média de 23 °C e umidade relativa média de 60%, até atingirem massa constante.

A determinação do teor de umidade dos *pellets* em base seca foi feita de acordo com a norma EN 14774-2 (DIN, 2009).

Para a determinação da umidade de equilíbrio higroscópico dos *pellets*, amostras foram colocadas em uma câmara climática a 20 °C e 65% de umidade relativa até atingir massa constante.

A densidade a granel (kg/m³) dos *pellets* foi obtida de acordo com a norma EN 15103 (DIN, 2010b), em amostras condicionadas a 65% de umidade relativa e 20 °C de temperatura. A densidade relativa aparente (kg/m³) dos *pellets* foi determinada conforme o método descrito por Vital (1984), por meio da imersão em mercúrio.

O diâmetro (mm) e comprimento (mm) dos *pellets* foram obtidos seguindo a norma EN 16127 (DIN, 2012).

A durabilidade e a porcentagem de finos dos *pellets* foram determinadas utilizando o equipamento *Ligno-Tester*, de acordo com a norma EN 15210-1 (DIN, 2010c). A determinação da dureza (kg) foi feita em um Durômetro para *pellets* da marca *Amandus Kahl*.

Para determinação do poder calorífico superior, porcentagem de cinzas e composição elementar, as amostras foram transformadas em serragem, utilizando-se um moinho de facas, de acordo com a norma TAPPI 257 cm-85 (TAPPI, 1985). Para poder calorífico útil e porcentagens de cinzas, foi utilizada a fração de serragem que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh. Para determinar a composição elementar, foi utilizada a fração de granulometria classificada entre as peneiras de 200 e 270 mesh.

O teor de extrativos foi determinado em duplicatas, conforme a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), apenas alterando o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno. O teor de lignina insolúvel foi determinado em duplicata pelo método *Klason*, modificado (GOMIDE; DEMUNER, 1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria (GOLDSCHIMID, 1971). O teor de lignina total foi obtido pela soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holocelulose (celulose e hemicelulose) foi obtido pelo somatório dos teores de extrativos, lignina total e teor de cinzas, decrescido de 100.

A composição elementar (carbono, nitrogênio, hidrogênio) foi determinada de acordo com a norma EN 15104 (DIN, 2011a). O equipamento utilizado foi o *Vario Micro Cube CHNS, Elementar*[®]. O teor de enxofre também foi determinado no analisador elementar. O valor de oxigênio foi obtido pelo somatório do carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e teor de cinzas decrescido de 100, conforme a norma EN 15296 (DIN, 2011b).

A composição química imediata da madeira e dos *pellets* foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), para as determinações de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo, em base seca.

O poder calorífico superior foi obtido de acordo com a norma da EN 14918 (DIN, 2010a), utilizando uma bomba calorimétrica adiabática *IKA300*[®].

A estimativa do poder calorífico útil foi realizada utilizando a Equação 1, conforme o Anexo E da norma EN 14918 (DIN, 2010a).

$$PCU_{\text{(pressão constante)}} = (PCS - 212,2 * H - 0,8*(O + N)) * (1 - 0,01 * M) - (24,43 * M) \quad (1)$$

Onde:

PCU_(pressão constante): poder calorífico útil em pressão constante, em J.g⁻¹;

PCS: poder calorífico superior, em J.g⁻¹;

H, O, N: hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, respectivamente, em porcentagem (%);

M: umidade, base úmida, em porcentagem (%);

Constantes: A energia de vaporização (pressão constante) para a água a 25 °C é de 44,01 kJ.mol⁻¹. Isto corresponde a 218,3 J.g⁻¹ para 1% de hidrogênio (m/m) ou 24,43 J.g⁻¹ para 1% de umidade (m/m) na amostra.

A densidade energética (GJ/m³) foi obtida por meio do produto do poder calorífico útil pela densidade a granel.

Para a análise termogravimétrica as amostras foram moídas e classificadas entre as peneiras sobrepostas de 200 e 270 mesh. O estudo de degradação térmica da madeira foi realizado utilizando equipamento *DTG-60* da *Shimadzu*. As análises foram realizadas sob atmosfera de gás nitrogênio, com uma vazão constante de 50 ml.min⁻¹. Os termogramas foram obtidos a partir da temperatura de 100 °C até a temperatura máxima de 500 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹.

A classificação dos *pellets* foi realizada de acordo com a norma Alemã EN 14961-2 (DIN, 2011c) e utilizada para fins de comparação da qualidade dos *pellets* produzidos neste trabalho.

2.5. Delineamento experimental

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, em um arranjo fatorial, com nove tratamentos (três temperaturas e três tempos) e três repetições, totalizando 27 unidades amostrais, mais três unidades amostrais referentes à testemunha (*pellets* não torreficados), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Delineamento experimental.

Identificação do Tratamento	Temperatura	Tempo
	°C	minutos
Testemunha	-	-
210-10	210	10
210-20	210	20
210-30	210	30
250-10	250	10
250-20	250	20
250-30	250	30
290-10	290	10
290-20	290	20
290-30	290	30

Os dados foram submetidos aos testes de *Lilliefors*, para testar a normalidade, e *Cochran*, para testar a homogeneidade das variâncias. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), para verificação das diferenças existentes entre os tratamentos. Quando estabelecidas diferenças significativas entre os tratamentos, ajustou-se um modelo linear simples (Modelo 1) ou polinomial quadrático (Modelo 2), que melhor se adequasse a cada variável analisada, levando-se em consideração o coeficiente de determinação (R²) no erro padrão residual e na distribuição dos resíduos.

$$y = ax + b + \varepsilon \quad (1)$$

$$y = ax^2 + bx + c + \varepsilon \quad (2)$$

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa *STATISTICA 8.0* (STATSOFT, 2007) e o ajuste dos modelos com o *CurveExpert 2.3* (HYAMS, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Aspecto visual dos *pellets* *in natura* e torreficados

Na Figura 3, são apresentadas as fotos dos *pellets* em função dos tratamentos térmicos, bem como para a testemunha.

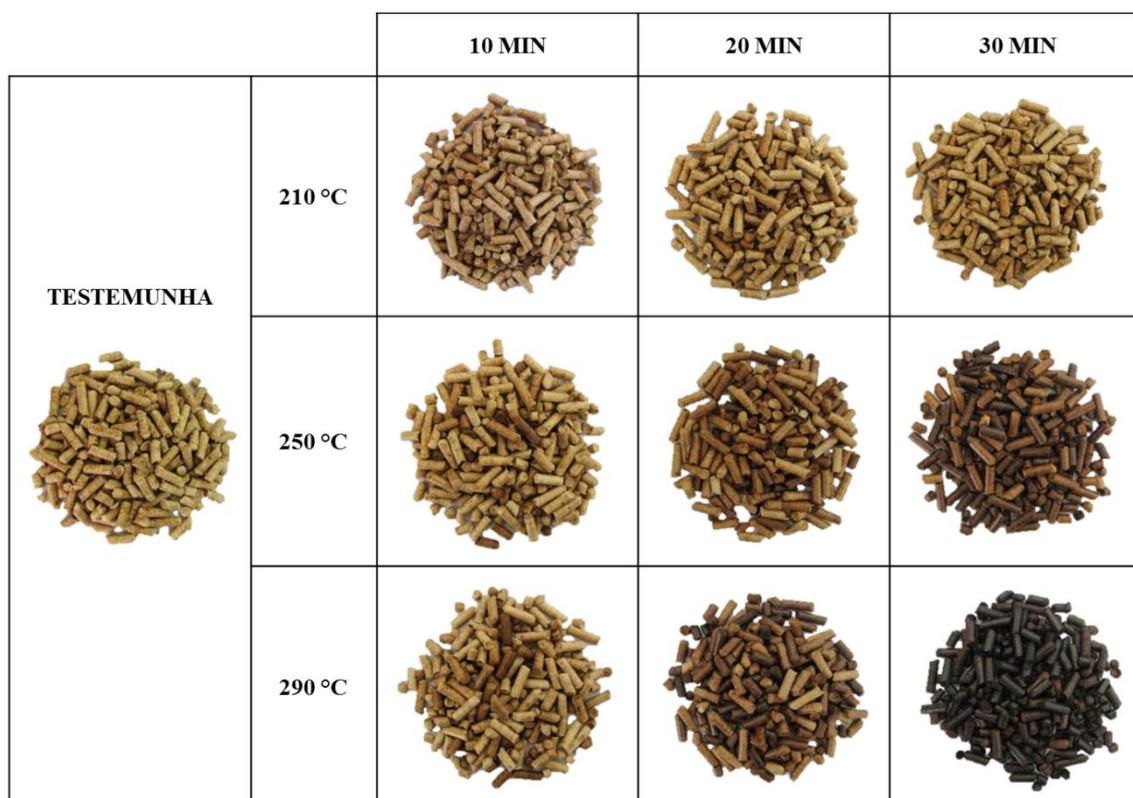


Figura 3 - Aspecto visual dos *pellets* em função da temperatura e do tempo de torrefação

Observa-se, na Figura 3, que o aumento da temperatura ou tempo do tratamento térmico promove o escurecimento dos *pellets*, podendo este aspecto visual estar relacionado ao grau de torrefação, conseqüentemente, associado com a degradação dos constituintes químicos da madeira.

Verifica-se também que os *pellets* se mantiveram íntegros ao fim da torrefação realizada no reator tipo rosca sem fim, evidenciando a viabilidade técnica do equipamento para o tratamento térmico de *pellets*.

3.2. Caracterização química dos *pellets*

3.2.1. Análise termogravimétrica (TG/DTG)

Na Figura 4, são apresentadas as curvas termogravimétricas TG (perda de massa) e DTG (variação da massa em função do tempo) para os *pellets in natura* e torreficados nas temperaturas de 210, 250 e 290 °C no tempo de 30 minutos, podendo, assim, observar o efeito da temperatura de torrefação.

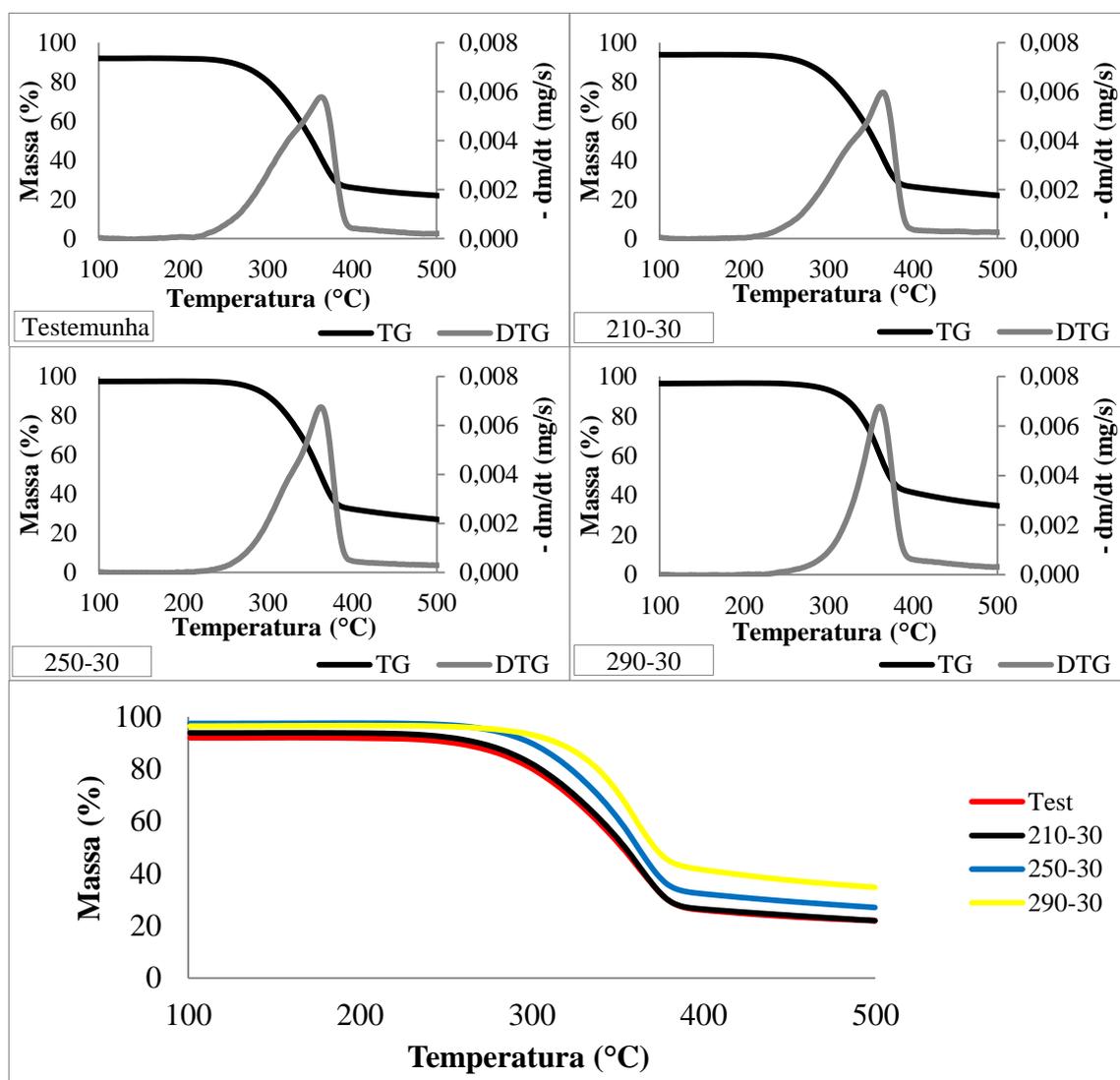


Figura 4 - Curvas de TG (massa) e DTG ($- dm/dt$) para a testemunha e *pellets* torreficados a 210, 250 e 290 °C no tempo de 30 minutos (Atmosfera de nitrogênio, taxa de aquecimento 10 °C/min e amostras a 0% de umidade)

Tabela 2 - Perda de massa percentual para a testemunha e *pellets* torreficados em função das faixas de temperatura da análise termogravimétrica

Tratamento	Faixas de temperatura (°C)								MR
	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	400-450	450-500	
Testemunha	0,0	0,19	1,47	10,36	28,59	25,44	2,47	1,59	21,98
210-30	0,0	0,10	1,58	10,38	28,93	26,54	2,32	2,06	22,04
250-30	0,0	0,0	0,65	7,26	29,04	28,42	2,87	2,32	27,07
290-30	0,0	0,0	0,34	3,26	22,47	29,19	3,94	2,71	34,79

MR = massa residual a 500 °C

Na Figura 5, são apresentadas as curvas termogravimétricas TG (perda de massa) e DTG (variação da massa em função do tempo) para os *pellets in natura* e torreficados a 290 °C nos tempos de 10, 20 e 30 minutos, podendo, assim, observar o efeito do tempo de torrefação.

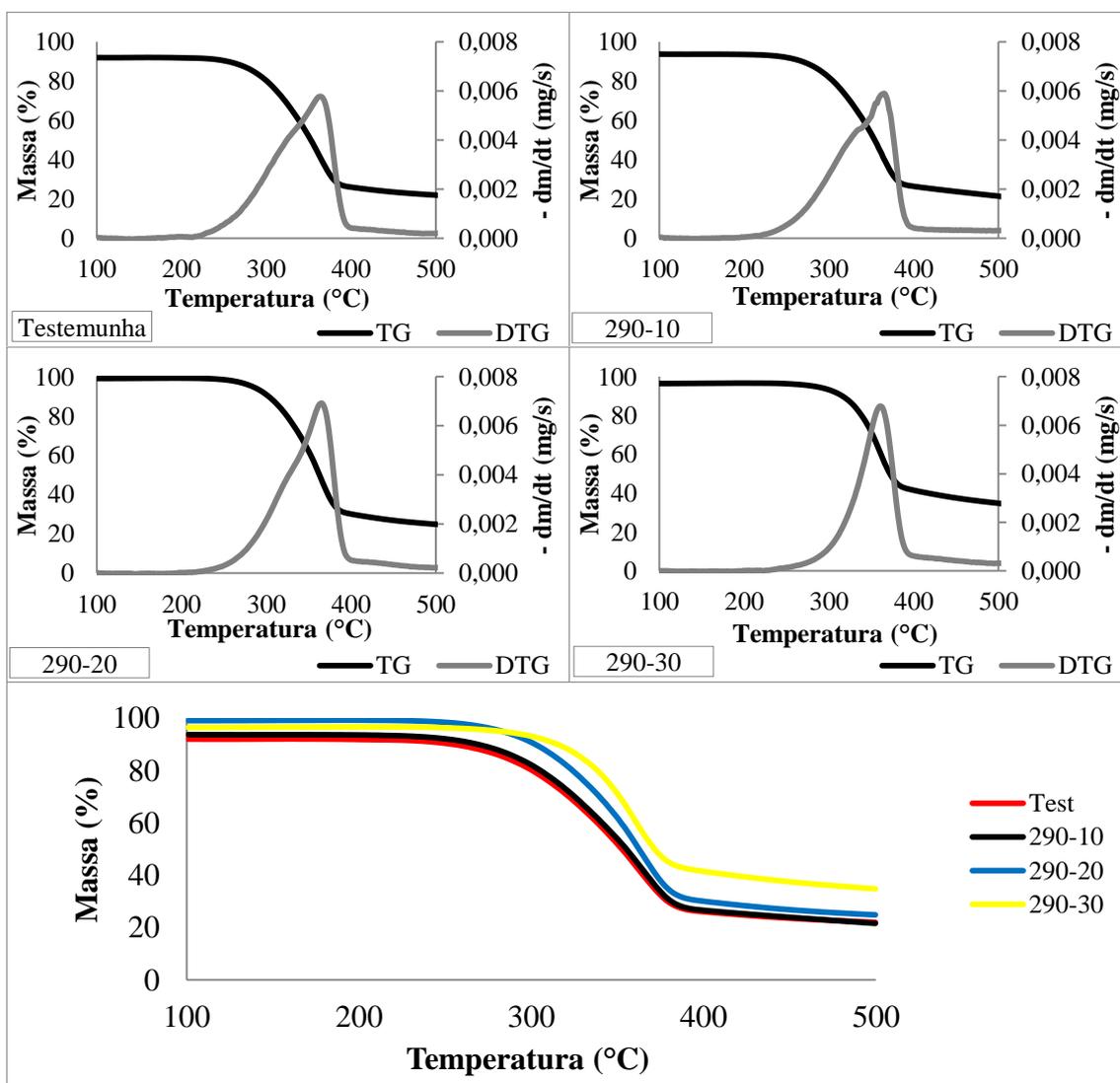


Figura 5 – Curvas de TG (massa) e DTG ($- dm/dt$) para a testemunha e *pellets* torreficados a 290 °C nos tempos 10, 20 e 30 minutos (Atmosfera de nitrogênio, taxa de aquecimento 10 °C/min e amostras a 0% de umidade)

Tabela 3 - Perda de massa percentual para a testemunha e *pellets* torreficados em função das faixas de temperatura da análise termogravimétrica

Tratamento	Faixas de temperatura (°C)								MR
	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	400-450	450-500	
Testemunha	0,0	0,19	1,47	10,36	28,59	25,44	2,47	1,59	21,98
290-10	0,05	0,12	1,49	10,14	28,54	26,87	2,65	2,35	21,58
290-20	0,0	0,19	0,65	7,26	29,04	28,42	2,87	2,32	27,07
290-30	0,0	0,0	0,34	3,26	22,47	29,19	3,94	2,71	34,79

MR = massa residual a 500 °C

Verifica-se, nas Figuras 4 e 5, uma maior perda de massa para a testemunha e para os tratamentos a 210 °C e 30 minutos e 290 °C e 10 minutos, podendo-se observar um pico de degradação devido à eliminação, principalmente, das hemiceluloses.

Por outro lado, os demais tratamentos de 250 e 290 °C apresentaram menor perda de massa, podendo atribuir esse resultado à, já citada, eliminação de parte das hemiceluloses e preservação da celulose e lignina durante o processo de torrefação dos *pellets*.

Com o aumento da temperatura ou tempo de torrefação, a faixa de degradação térmica dos *pellets* se torna mais estreita, podendo ser observado na curva de DTG (-dm/td) (Figuras 4 e 5). Para a testemunha, a degradação inicia-se por volta de 240 °C e, para o tratamento térmico mais severo (290 °C e 30 minutos), inicia-se próximo aos 270 °C, e os demais tratamentos têm temperaturas iniciais de degradação intermediárias às citadas. Independente do tratamento, aos 380 °C, tem-se a maior parte da degradação térmica dos *pellets*, onde, possivelmente, resta na biomassa apenas a lignina, que apresenta uma ampla faixa de degradação e grande estabilidade térmica quando comparada à celulose e hemiceluloses.

A degradação das hemiceluloses inicia-se em torno de 220 °C e se estende até os 300 °C, com pico máximo de perda de massa por volta de 270 °C. As hemiceluloses são compostas por vários açúcares, formando uma estrutura amorfa e ramificada, sendo facilmente degradada em baixas temperaturas. A celulose possui faixa de degradação em temperaturas mais elevadas, entre 300 e 380 °C, com maior perda de massa próxima aos 350 °C. Mais estável termicamente, a celulose é formada unicamente por glicose, que, com sua organização bem definida, forma uma estrutura cristalina sem ramificações. A lignina pode ser considerada o componente da madeira de maior estabilidade térmica. Sua degradação é progressiva, inicia-se em baixas temperaturas, em torno de 150 °C, estendendo-se até altas temperaturas. Essa característica pode ser atribuída às unidades de fenil propano que formam fortes ligações entre si, dando origem a uma molécula condensada com grande resistência à degradação térmica (YANG et al., 2007; ZHOU et al., 2013).

Observa-se, nas Tabelas 2 e 3, que o início da perda de massa para a testemunha e para os tratamentos a 210 °C e 30 minutos e 290 °C e 10 minutos ocorre na faixa de temperatura de 200 a 250 °C, o que indica a presença das hemiceluloses. Em contrapartida, o aumento da temperatura de torrefação ou do tempo de residência retarda o início da perda de massa para temperaturas superiores, mostrando que a torrefação aumenta a estabilidade térmica da biomassa. Na prática, uma biomassa mais

estável termicamente promove maior liberação de energia no momento da combustão, pois apresenta componentes com ligações químicas mais fortes, que, quando oxidadas, liberam maior quantidade de energia.

A maior massa residual a 500 °C confirma a maior estabilidade térmica dos *pellets* obtidos nos tratamentos 250 °C e 30 minutos, 290 °C e 20 minutos e 290 °C e 30 minutos, sendo este último o que apresentou maior massa residual, devido ao seu maior teor de lignina, componente mais estável termicamente presente na biomassa.

3.2.2. Composição química elementar

Na Tabela 4, são apresentados os valores da composição elementar e teor de cinzas para a testemunha e *pellets* torreficados.

Tabela 4 - Teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e cinzas

Tratamento	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Enxofre*	Oxigênio	Cinzas
	%	%	%	%	%	%
<i>Testemunha</i>	46,7	5,8	0,17	0,0	47,1	0,13
210 - 10	47,9	5,9	0,15	0,0	45,9	0,12
210 - 20	47,3	5,9	0,17	0,0	46,5	0,13
210 - 30	47,1	5,8	0,17	0,0	46,8	0,13
250 - 10	45,2	5,6	0,20	0,0	48,8	0,12
250 - 20	49,3	6,1	0,16	0,0	44,3	0,12
250 - 30	53,1	5,6	0,18	0,0	41,0	0,10
290 - 10	48,0	6,0	0,16	0,0	45,7	0,10
290 - 20	52,0	6,2	0,18	0,0	41,5	0,13
290 - 30	51,4	5,0	0,18	0,0	43,3	0,20

* Não detectado

Observa-se, na Tabela 4, de modo geral, um aumento dos teores de carbono e nitrogênio e, em contrapartida, a redução dos teores de hidrogênio e oxigênio dos *pellets* torreficados, com o aumento da temperatura ou tempo de torrefação. Tumuluru et al. (2011) relatam que o processo de torrefação aumenta o conteúdo de carbono, em detrimento à eliminação do hidrogênio e oxigênio presente na biomassa.

O teor de carbono aumenta devido a sua fixação, pois é o elemento mais estável termicamente dentre os analisados. Além disso, contribui de forma positiva para a geração de energia, podendo ser utilizado como parâmetro na seleção de biomassas destinadas à combustão (REIS et al., 2012).

O hidrogênio, mesmo presente em pequenas quantidades na madeira, é um dos elementos que mais contribui para geração de energia durante a combustão, por apresentar alto poder calorífico (REIS et al., 2012). Segundo Nhuchhen et al. (2014), o aumento do tempo ou temperatura de torrefação tem efeito negativo na concentração de hidrogênio, pois elimina parte do mesmo na forma de gases voláteis. Logo, o controle da temperatura é importante para manter na massa residual o carbono e hidrogênio, minimizando as perdas dos elementos mais energéticos.

O nitrogênio não tem efeito significativo no poder calorífico superior da biomassa. Teores desse elemento superiores a 0,6% são indesejáveis durante a combustão, pois podem ser formados compostos nitrogenados como NO_x , N_2O e HCN, que são altamente prejudiciais ao meio ambiente (OBERNBERGER et al., 2006; TUMULURU et al., 2011).

O oxigênio, ao contrário do carbono e hidrogênio, contribui de forma negativa para a geração de energia, devido à redução do poder calorífico superior da biomassa (CARNEIRO et al., 2014; NHUCHHEN et al., 2014).

O teor de cinzas mostra uma tendência de aumento, principalmente, para os tempos de torrefação de 20 e 30 minutos na temperatura de 290 °C (Tabela 4). Esse aumento é característico para a biomassa torrificada, devido ao processo ocorrer em baixas temperaturas, portanto, degradando apenas os componentes orgânicos e preservando os componentes inorgânicos presentes na madeira (PHANPHANICH; MANI, 2011). Salienta-se que altos teores de cinzas, além de reduzir o poder calorífico superior, são prejudiciais aos processos de queima, pois causam incrustações nas câmaras de combustão, corrosão de tubulações e demais equipamentos, além da geração de resíduos (NHUCHHEN et al., 2014).

3.2.3. Composição química estrutural e imediata

Na Tabela 5, são apresentados os valores médios da composição química estrutural e imediata dos *pellets*.

Tabela 5 - Teores de extrativos, lignina, holocelulose, materiais voláteis e carbono fixo em função dos tratamentos

Tratamento	Extrativos	Lignina	Holocelulose	Voláteis	Carbono Fixo
<i>Testemunha</i>	6,5 ab	28,6 e	64,7 a	85,9 a	13,9 c
<i>210-10</i>	6,7 ab	29,7 e	63,4 ab	85,7 ab	14,2 bc
<i>210-20</i>	6,1 b	29,5 e	64,3 a	85,8 ab	14,1 bc
<i>210-30</i>	6,1 b	28,9 e	64,9 a	85,7 ab	14,2 bc
<i>250-10</i>	6,2 b	29,9 e	63,8 a	86,4 a	13,5 c
<i>250-20</i>	6,3 ab	31,5 d	62,0 b	84,6 ab	15,3 bc
<i>250-30</i>	6,6 ab	36,0 b	57,4 d	84,3 ab	15,6 bc
<i>290-10</i>	6,0 b	29,5 e	64,4 a	85,6 ab	14,3 bc
<i>290-20</i>	7,1 a	33,3 c	59,5 c	83,5 b	16,3 b
<i>290-30</i>	6,3 ab	48,5 a	45,0 e	76,4 c	23,4 a

Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si a 5% de significância pelo teste *Tukey*

Observa-se, de modo geral, uma tendência de redução no teor de holocelulose nos *pellets* torreficados, sendo significativa para os tratamentos a 250 e 290 °C, nos tempos de 20 e 30 minutos. Ressalta-se que a celulose apresenta baixa ou nenhuma contribuição na redução da quantidade de holocelulose, uma vez que sua degradação inicia-se a partir de 300 °C (ZHOU et al., 2013). Portanto, a redução observada deve-se, principalmente, à eliminação de hemiceluloses, o que resulta em melhorias significativas na qualidade da biomassa, pois diminui a umidade de equilíbrio higroscópico devido à perda de grupos (-OH), reduzindo, conseqüentemente, os sítios de adsorção de água na biomassa (PHANPHANICH; MANI, 2011). Também pode-se destacar o aumento do poder calorífico superior devido a estes componentes serem menos energéticos quando comparados aos demais, como lignina, celulose e extrativos, que, em sua maioria, permanecem no material torreficado.

Quanto ao teor de extrativos, observa-se a tendência de aumento com o acréscimo do tempo ou temperatura de torrefação. Uma possível explicação para o aumento seria a formação produtos parcialmente degradados oriundos dos componentes da madeira menos estáveis termicamente, sendo esses produtos removidos pelos solventes utilizados na análise e, conseqüentemente, contabilizados como extrativos (BRITO et al., 2008).

Observa-se que o teor de lignina aumentou significativamente em detrimento à degradação das hemiceluloses. A maior concentração da lignina pode resultar em um aumento do poder calorífico superior dos *pellets*, uma vez que se trata de um

componente estrutural com maior quantidade de ligações químicas entre elementos, principalmente o carbono, que liberam grande quantidade de energia quando oxidadas. Além disso, devido ao arranjo estrutural da lignina, a mesma é hidrofóbica, exercendo influência sobre a umidade de equilíbrio higroscópico dos *pellets*, reduzindo este valor à medida que sua proporção aumenta.

Verifica-se que o teor de materiais voláteis diminuiu com o aumento do tempo de residência, principalmente, nas temperaturas de 250 e 290 °C, tendo, nesta última, ocorrido uma maior redução, 11,1% em comparação com a testemunha.

O carbono fixo apresentou um acréscimo com o aumento do tempo ou temperatura de torrefação, o maior incremento foi observado na temperatura de 290 °C 30 minutos de torrefação, correspondendo a 67,9% em comparação com a testemunha.

A redução do teor de materiais voláteis para os *pellets* torreficados ocorreu devido à degradação de componentes menos estáveis termicamente, como hemiceluloses e extrativos. A degradação de parte destes componentes formam gases compostos basicamente de CO e CO₂ (PARK et al., 2013). Ressalva-se que os materiais voláteis retirados da madeira são ricos em oxigênio, e sua redução somada ao incremento do teor de carbono fixo, que está relacionado ao carbono mais energético presente na madeira, promove o aumento do poder calorífico superior (PENG et al., 2013).

3.3. Propriedades dos *pellets*

Na Figura 6, são apresentados os valores médios para a umidade de equilíbrio higroscópico dos *pellets*, em base seca.

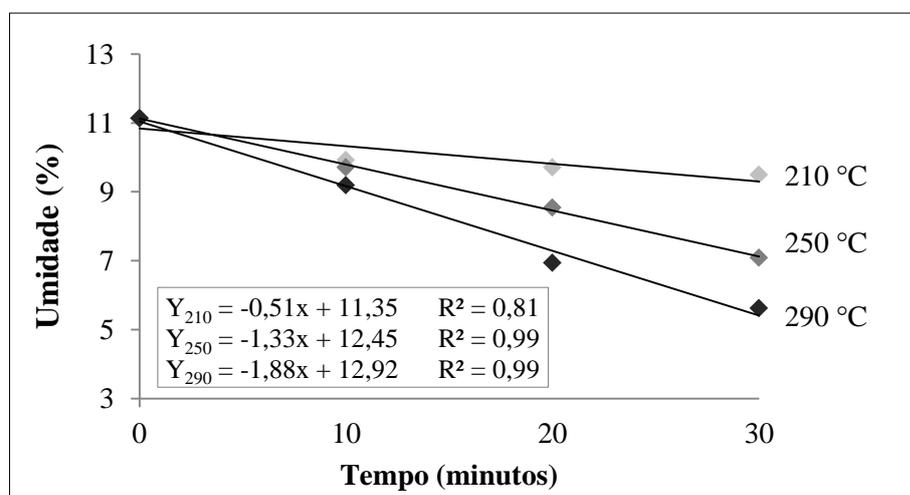


Figura 6 - Valores médios observados e estimados para a umidade de equilíbrio higroscópico dos *pellets* em função dos tratamentos

Observa-se forte relação das variáveis tempo e temperatura sobre a umidade de equilíbrio higroscópico dos *pellets*. O modelo linear simples apresentou bom ajuste, com coeficientes de determinação significativos para as diferentes temperaturas avaliadas.

O tratamento térmico promoveu a redução da umidade de equilíbrio higroscópico com o aumento da temperatura ou tempo de torrefação, essa redução chegou a 49,5% em comparação da testemunha com o tratamento de 290 °C e 30 minutos.

A redução da umidade de equilíbrio ocorre devido à degradação térmica de componentes mais hidrofílicos, como as hemiceluloses (Tabela 5), que são ricas em grupos (-OH), responsáveis pela adsorção de água na estrutura dos *pellets*. Por outro lado, componentes mais estáveis termicamente como a lignina são preservados (Tabela 5), por possuírem característica hidrofóbica, as quais conferem à biomassa menor umidade de equilíbrio.

Na prática, uma menor umidade contribui de forma positiva para o aumento do poder calorífico útil, uma vez que a água presente na biomassa reduz a geração de energia no momento da combustão. De modo geral, a redução da umidade para *pellets* promove um aumento significativo em sua resistência mecânica, diminuindo a geração de finos durante o transporte e armazenamento. Além disso, dificulta a ocorrência e degradação por microrganismos decompositores da madeira quando armazenados por longos períodos de tempo (LIU et al., 2014).

Nas Figuras 7 e 8, são apresentados, respectivamente, os valores observados e estimados da densidade a granel e aparente dos *pellets* em função dos tratamentos.

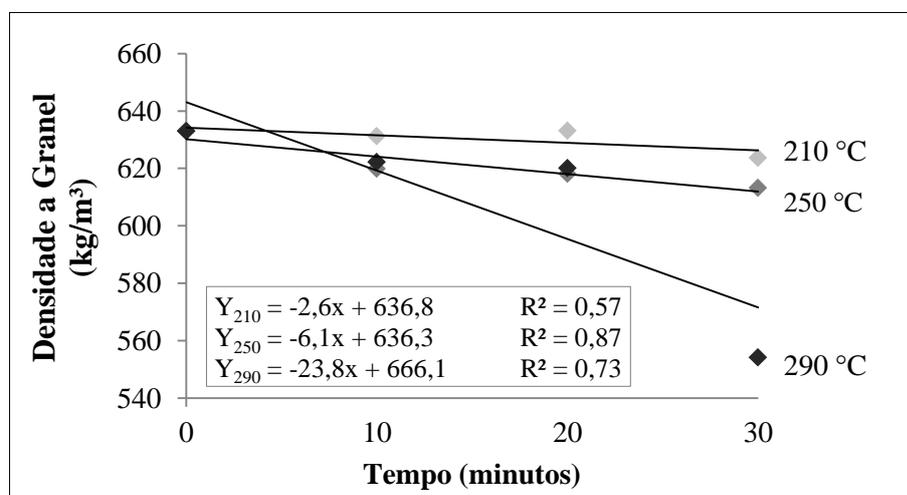


Figura 7 - Valores médios observados e estimados para a densidade a granel dos *pellets* em função dos tratamentos

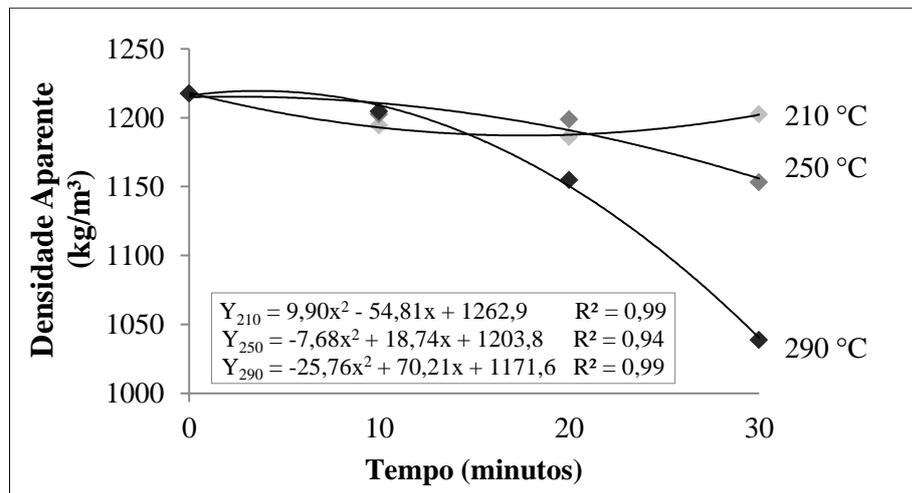


Figura 8 - Valores médios observados e estimados para a densidade aparente dos *pellets* em função dos tratamentos

Observa-se tendência de redução da densidade a granel dos *pellets* como o aumento do tempo ou temperatura de torrefação. O modelo linear apresentou melhor ajuste para a densidade a granel, porém obteve coeficiente de determinação significativo apenas para a temperatura de 250 °C. O tratamento de 290 °C e 30 minutos promoveu a maior redução na densidade a granel, correspondendo a 12,5% em comparação com a testemunha (Figura 7). Ressalva-se que são desejáveis *pellets* como maior densidade a granel possível, pois esta contribui para uma maior densidade energética, ou seja, para uma maior quantidade de energia por unidade volumétrica. Ademais, permite o transporte a maiores distâncias e otimiza o espaço de armazenamento (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009).

A densidade aparente tem relação direta com a densidade a granel dos *pellets*, foi observada tendência de redução da densidade aparente com o aumento do tempo de residência, principalmente, nas temperaturas de 250 e 290 °C. O modelo polinomial quadrático obteve o melhor ajuste, apresentando alto coeficiente de determinação em todas as temperaturas de torrefação (Figura 8).

A redução da densidade a granel e aparente é resultado da diminuição da umidade de equilíbrio dos *pellets* (Figura 6), e para os tratamentos mais intensos ocorre também devido à maior perda de massa em relação à contração volumétrica.

Na Figura 9, são apresentados os valores observados e estimados para o diâmetro dos *pellets* em função dos tratamentos.

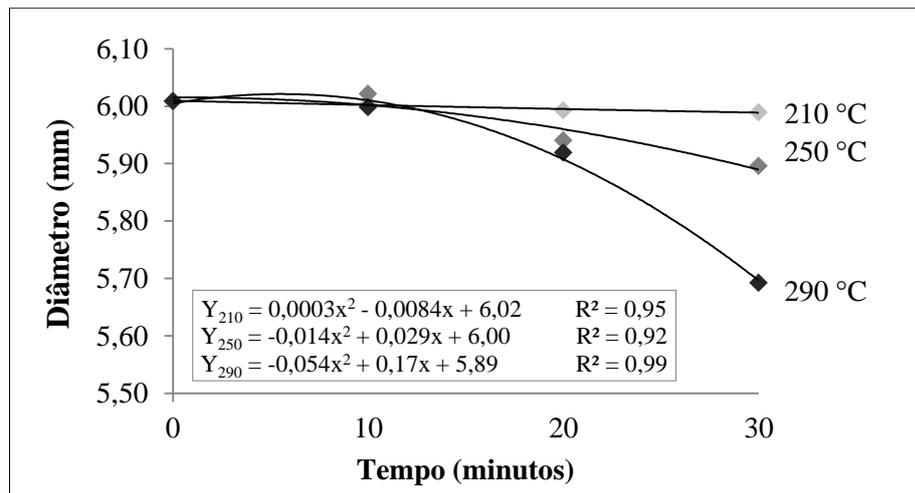


Figura 9 - Valores médios observados e estimados para o diâmetro dos *pellets* em função dos tratamentos

Observa-se tendência de redução do diâmetro dos *pellets* como o aumento do tempo ou temperatura de torrefação. O modelo polinomial quadrático teve ajuste satisfatório, com coeficientes de determinação significativos em todas as temperaturas avaliadas. O diâmetro dos *pellets* diminui em função da contração sofrida durante o tratamento térmico. A eliminação de componentes menos estáveis termicamente que estão presentes na madeira faz com que ocorra um rearranjo na estrutura dos *pellets*, efeito que ocorre também devido à menor expansão ocasionada pela redução de sua higroscopicidade.

O comprimento dos *pellets* não foi afetado pelo tratamento térmico, ocorrendo apenas uma ligeira redução dos *pellets* torreficados em relação à testemunha, que apresentou média de 20 mm, enquanto os *pellets* torreficados obtiveram média de 17,1 mm. Essa redução pode ser atribuída ao tipo de reator utilizado na torrefação, devido à constante movimentação da massa de *pellets*.

A redução do comprimento observada neste trabalho, de modo geral, não afeta a utilização dos *pellets* para geração de energia. No entanto, ressalta-se que pode ocorrer geração de finos e consequente perda de massa, reduzindo o seu valor comercial.

Nas Figuras 10A, 10B e 11, são apresentados os valores observados e estimados para os parâmetros durabilidade, finos e dureza, respectivamente. Essas propriedades estão relacionadas à resistência mecânica dos *pellets*.

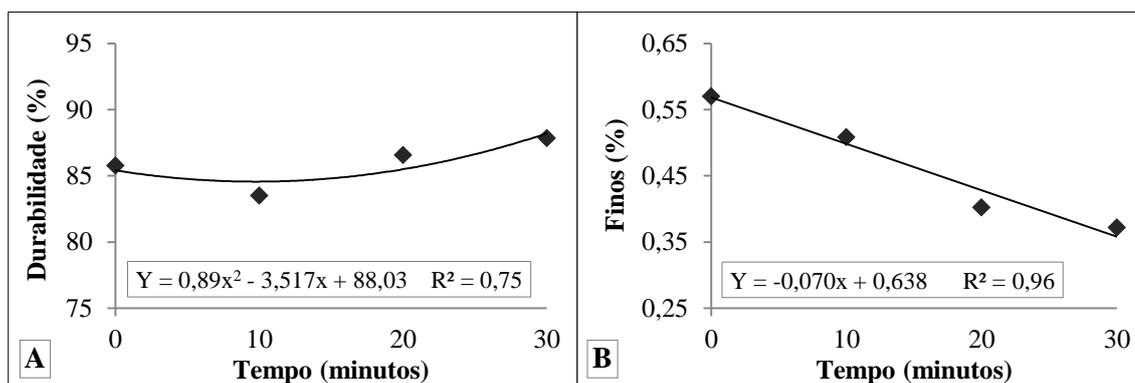


Figura 10 - Valores observados e estimados para durabilidade (A) e finos (B) em função do tempo de residência

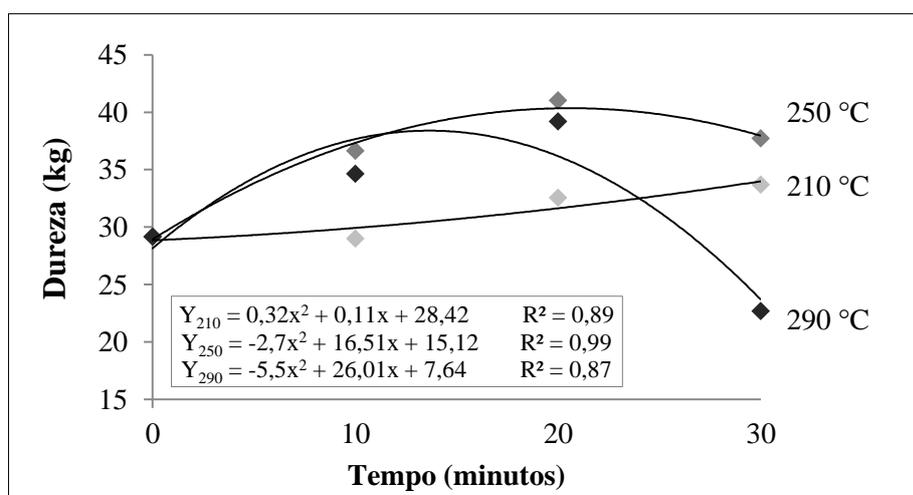


Figura 11 - Valores médios observados e estimados para dureza dos *pellets* em função dos tratamentos

Verifica-se tendência de aumento da durabilidade para o efeito do tempo de residência, não sendo observado efeito significativo da temperatura de torrefação (Figura 10A). O teor de finos reduziu com o aumento do tempo de residência, não havendo efeito da temperatura de torrefação (Figura 10B).

A dureza mede a resistência à compressão perpendicular ao comprimento dos *pellets*. Observa-se um aumento da dureza com o acréscimo do tempo de torrefação na temperatura de 210 °C, e, para as temperaturas de 250 e 290 °C, observa-se uma tendência de aumento com posterior redução (Figura 11). O modelo polinomial quadrático apresentou ajuste satisfatório aos dados, obtendo coeficientes de determinação significativos para todas as temperaturas. A redução da dureza dos *pellets*, quando ocorre, pode ser justificada pela maior degradação térmica, acarretando em perdas de massa significativas, o que diminui consideravelmente a resistência mecânica dos mesmos.

O aumento da resistência mecânica dos *pellets* ocorre, principalmente, devido à redução da umidade de equilíbrio, que tem efeito inverso sobre tal propriedade (LIU et al., 2014). A água, quando presente nos *pellets*, ocupa o lugar de ligações de hidrogênio que, em conjunto com a lignina, são fundamentais para a coesão entre as partículas de madeira.

A resistência mecânica de *pellets* é de grande importância no momento do transporte e armazenamento, as quais são atividades que, em algum momento, são empregadas máquinas para movimentação da massa de *pellets* ou, no caso do transporte, que são, constantemente, submetidos a esforços e às condições das estradas (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009).

Nas Figuras 12 e 13, são apresentados os valores médios observados e estimados para o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico útil (PCU) dos *pellets*, respectivamente.

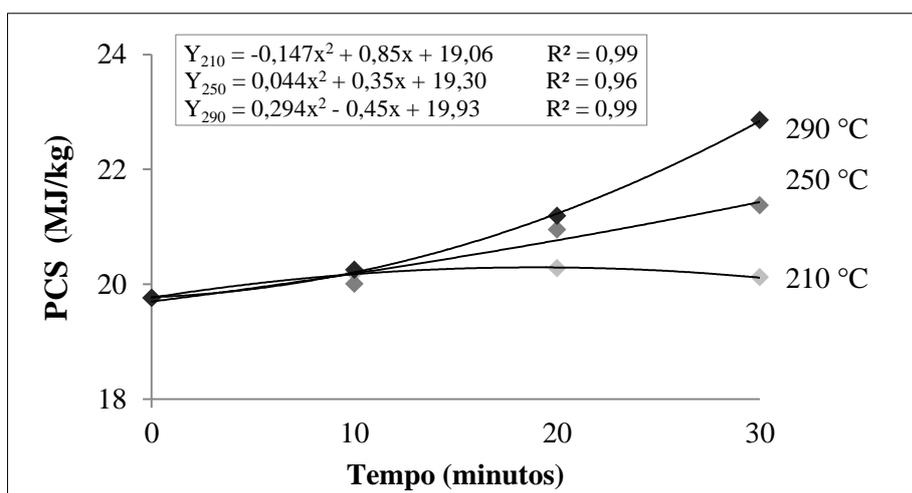


Figura 12 - Valores médios observados e estimados para o poder calorífico superior dos *pellets* em função dos tratamentos

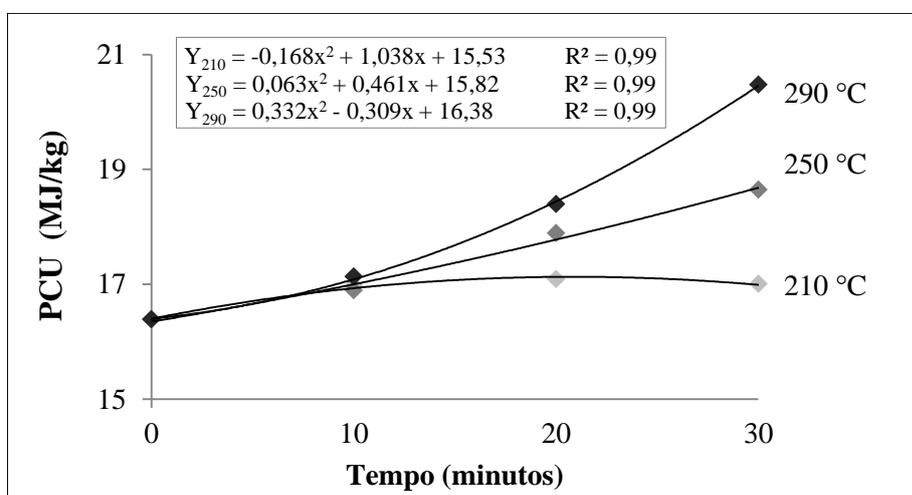


Figura 13 - Valores médios observados e estimados para o poder calorífico útil dos *pellets* em função dos tratamentos

O modelo polinomial quadrático foi mais adequado para representar a variação dos dados de poder calorífico superior e útil, obtendo coeficientes de determinação satisfatórios em todos os ajustes (Figuras 12 e 13, respectivamente).

Observa-se tendência de aumento do poder calorífico superior com o acréscimo do tempo de residência, principalmente, nas temperaturas de 250 e 290 °C, em contrapartida, não foi observado expressivo incremento para os *pellets* torreficados a 210 °C. O aumento no poder calorífico superior dos *pellets* torreficados a 290 °C e 30 minutos foi de 15,7% em comparação à testemunha. O aumento proporcional da lignina em detrimento à eliminação das hemiceluloses é o principal fator a influenciar o acréscimo do poder calorífico (Tabela 5).

O poder calorífico superior é a quantidade de energia máxima que um combustível pode liberar no momento da combustão, sendo necessárias condições ideais de queima, podendo também ser definido como a máxima energia teórica de um combustível. O poder calorífico superior em conjunto com a umidade de equilíbrio formam o poder calorífico útil, que, por sua vez, considera a energia necessária para evaporar a água e tem relação direta com a quantidade de energia liberada durante a combustão da madeira em condições de campo.

Observa-se o aumento do poder calorífico útil com o acréscimo do tempo de residência, estando mais evidente nas temperaturas de 250 e 290 °C. O maior valor foi observado para o tratamento 290 °C e 30 minutos, correspondendo a 24,9% de acréscimo em relação à testemunha. O aumento do poder calorífico útil com a intensificação do tratamento térmico se deve ao aumento do poder calorífico superior (Figura 12) e a redução da umidade de equilíbrio higroscópico dos *pellets* (Figura 6).

Na Figura 14, são apresentados os valores médios observados e estimados para a densidade energética dos *pellets*.

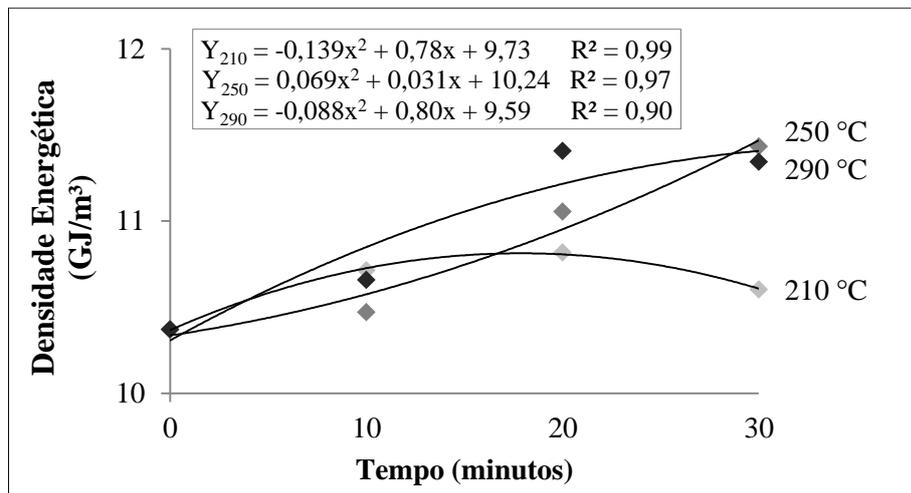


Figura 14 - Valores médios observados e estimados para a densidade energética dos *pellets* em função dos tratamentos.

Observa-se tendência de aumento da densidade energética com o acréscimo do tempo de residência, exceto para os *pellets* torreficados a 210 °C, no qual se verificou aumento da densidade energética somente até o tempo de 20 minutos. O modelo polinomial quadrático apresentou melhor qualidade de ajuste, com coeficientes de determinação satisfatórios nas diferentes temperaturas avaliadas. O maior valor foi observado para o tratamento de 250 °C e 30 minutos, perfazendo um aumento de 10,2% em relação à testemunha.

O aumento da densidade energética é função do incremento no poder calorífico útil (Figura 13) e do acréscimo da densidade a granel (Figura 7), ambos são efeitos conhecidos do processo de torrefação da madeira.

A densidade energética pode ser definida como a quantidade de energia útil liberada por um combustível por unidade de volume, quando submetido à combustão. Sendo assim, permite avaliar o potencial de determinada biomassa para geração de energia, pois contribui positivamente para a otimização do transporte, reduzindo custos e aumentando o raio de abrangência. Ademais, viabiliza o armazenamento de grandes quantidades de energia por longos períodos de tempo.

3.4. Norma de qualidade para *pellets*

No Quadro 1, é apresentado um resumo da classificação para os *pellets* em função dos tratamentos, de acordo com a norma de comercialização EN 14 961-2 (DIN, 2011c).

Quadro 1 - Classificação dos *pellets* de madeira para uso não industrial, de acordo com a norma de qualidade EN 14 961-2

Propriedade	Unidade	Valor Especificado	Testemunha	210 °C			250 °C			290 °C		
				10	20	30	10	20	30	10	20	30
<i>Diâmetro</i>	mm	6 ± 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Comprimento (C)</i>	mm	3,15 ≤ C ≤ 40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Umidade - base úmida</i>	%	≤ 10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Umidade - base seca</i>	%	≤ 11,1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Densidade a Granel</i>	kg/m ³	≥ 600	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
<i>Poder Calorífico Útil (PCU)</i>	MJ/kg	16,5 ≤ PCU ≤ 19	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
<i>Cinzas</i>	%	≤ 0,7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Durabilidade Mecânica</i>	%	≥ 97,5	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Finos</i>	%	≤ 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓: diretriz cumprida; x: diretriz não cumprida.

Todos os tratamentos atenderam à norma quanto ao diâmetro, comprimento, umidade base úmida e base seca, teor de cinzas e porcentagem de finos.

Para a densidade a granel, apenas o tratamento a 290 °C e 30 minutos não apresentou resultado satisfatório, apresentando valor inferior ao estipulado pela norma, devido à maior degradação térmica e consequente perda de massa.

Os *pellets* não torreficados apresentaram valor de poder calorífico útil inferior ao mínimo exigido pela norma. Isso demonstra a importância do tratamento térmico para o aumento do poder calorífico útil dos *pellets*. O tratamento 290 °C e 30 minutos apresentou valor superior ao estipulado pela norma, porém, melhorias na eficiência energética da biomassa são sempre desejáveis.

Nenhum dos tratamentos apresentou valor de durabilidade mecânica satisfatória que se adequasse ao mínimo estipulado pela norma. Vale ressaltar que o processo de torrefação promoveu melhorias significativas na resistência mecânica dos *pellets* para alguns tratamentos, como observado nas Figuras 10A, 10B e 11. Sendo assim, deve-se buscar aumentar a resistência inicial dos *pellets*, para que quando submetidos ao processo de torrefação, tenham, ao final, a resistência mínima exigida. Uma opção seria a adição de algum ligante no momento da peletização, melhorando assim a ligação entre as partículas, com consequente melhoria das propriedades mecânicas.

4. CONCLUSÕES

O tratamento térmico promoveu diversas modificações nas propriedades dos *pellets* de *Pinus* sp., dentre elas, destaca-se a redução da umidade de equilíbrio higroscópico, aumento do poder calorífico superior e útil, redução do diâmetro, aumento da estabilidade térmica e algumas melhorias nas propriedades mecânicas.

O comprimento dos *pellets* foi reduzido em comparação com a testemunha, sendo mais influenciado pelo equipamento utilizado na torrefação.

Todos os tratamentos apresentaram resultados satisfatórios e se enquadraram a norma de comercialização, exceto quanto à durabilidade.

O tratamento realizado a 250 °C e 30 minutos foi a melhor opção para torrefação de *pellets* de *Pinus* sp..

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: Análise química imediata do carvão vegetal**. Rio de Janeiro,: 8 p. 1986.

BRITO, J. O.; SILVA, F. G.; LEÃO, M. M.; ALMEIDA, G. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 18, p. 8545-8548, 2008.

CARNEIRO, A. D. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C. D.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de Eucalyptus sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, p. 375-381, 2014.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 14774-2: Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method**. Alemanha: CEN: 9 p. 2009.

_____. **DIN EN 14918: Determination of calorific value**. Belim: CEN: 63 p. 2010.

_____. **EN 15103: Solid biofuels - Determination of bulk density**. Alemanha: CEN: 14 p. 2010.

_____. **EN 15210-1: Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets**. Alemanha: CEN: 12 p. 2010.

_____. **DIN EN 15104: Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods**. Berlim: CEN: 15 p. 2011.

_____. **DIN EN 15296: Conversion of analytical results from one basis to another**. Berlim: CEN: 15 p. 2011.

_____. **EN 14961-2: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Wood pellets for non-industrial use**. Alemanha: CEN: 15 p. 2011.

_____. **EN 16127: Solid biofuels - Determination of length and diameter of pellets**. Alemanha: CEN: 11 p. 2012.

GHIASI, B.; KUMAR, L.; FURUBAYASHI, T.; LIM, C. J.; BI, X.; KIM, C. S.; SOKHANSANJ, S. Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification? **Applied Energy**, v. 134, p. 133-142, 2014.

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

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

HYAMS, D. G. **Curve Expert Professional 2.3**, 2013.

KALIYAN, N.; VANCE MOREY, R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

LIU, Z. G.; QUEK, A.; BALASUBRAMANIAN, R. Preparation and characterization of fuel *pellets* from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. **Applied Energy**, v. 113, p. 1315-1322, 2014.

NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, v. 2014, p. 56, 2014.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 11, 2006.

PARK, J.; MENG, J. J.; LIM, K. H.; ROJAS, O. J.; PARK, S. Transformation of lignocellulosic biomass during torrefaction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 100, p. 199-206, 2013.

PENG, J. H.; BI, X. T.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C. J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, v. 111, p. 411-421, 2013.

PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 1246-1253, 2011.

REIS, A. A. D.; PROTÁSIO, T. D. P.; MELO, I. C. N. A. D.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. D. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **2012**, v. 32, n. 71, 2012.

SHAW, M. D.; KARUNAKARAN, C.; TABIL, L. G. Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 2, p. 198-207, 2009.

STATSOFT, I. N. C. **Statistica data analysis software system version 8.0**. Tulsa, USA 2007.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 257 cm-85: Sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta: TAPPI. 1985.

_____. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta, USA. 1996.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais: 21 p. 1984.

WARAJANONT, S.; SOPONPONGPIPAT, N. Effect of particle size and moisture content on cassava root pellet fuel's qualities follow the acceptance of pellet fuel standard. **International Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 2, n. 2, p. 74-79, 2013.

YANG, H. P.; YAN, R.; CHEN, H. P.; LEE, D. H.; ZHENG, C. G. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

ZHOU, H.; LONG, Y.; MENG, A.; LI, Q.; ZHANG, Y. The pyrolysis simulation of five biomass species by hemi-cellulose, cellulose and lignin based on thermogravimetric curves. **Thermochimica Acta**, v. 566, p. 36-43, 2013.

CONCLUSÕES GERAIS

A torrefação de partículas de madeira por curtos períodos de tempo é viável tecnicamente, gerando um produto com alto rendimento energético. Promove melhorias significativas nas propriedades da madeira que, em conjunto, irão contribuir para o aumento da densidade energética.

A torrefação dos *pellets* de *Pinus* sp. proporcionou melhorias na sua qualidade, principalmente, o aumento da densidade energética e melhorias nas propriedades mecânicas. O tratamento realizado a 250 °C e 30 minutos mostrou-se como melhor opção para o tratamento térmico dos *pellets* de *Pinus* sp., por gerar um produto mais energético e de maior resistência mecânica.

O reator se mostrou adequado para torrefação de partículas de madeira em curtos tempos de residência, sendo necessárias apenas algumas melhorias para a otimização do processo de torrefação. Também pode ser empregado na torrefação de *pellets* com resultados satisfatórios.

Desse modo, o presente estudo atingiu o objetivo de apresentar uma alternativa para a melhora das propriedades energéticas da biomassa por meio da torrefação e densificação, frente à importância do desenvolvimento de tecnologias e processos para obtenção de uma biomassa energética e competitiva.