III CBCTEM
Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira
Florianópolis - 2017

EFEITO DA TORREFAÇÃO NAS PROPRIEDADES DE PELLETS PRODUZIDOS COM MADEIRA DE Pinus sp.

Laura Lima[1]
Mateus Alves de Magalhães[1]
Carlos Miguel Simões da Silva[2]
Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[3]
Ana Paula Silva[4]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Engenharia Florestal - Laboratório de Paineis e Energia da Madeira
[3] UFV -DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL / Universidade Federal de Viçosa
[4] Universidade de São Paulo

EFEITO DA TORREFAÇÃO NAS PROPRIEDADES DE *PELLETS* PRODUZIDOS COM MADEIRA DE *Pinus* sp.

Laura V. L. **LIMA**[1]; Mateus A. de **MAGALHÃES**[2]; Carlos M. S. da **SILVA**[2];
Ana Paula de S. **SILVA**[3]; Angélica de C. O. **CARNEIRO**[4]

[1] Graduanda em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa
[2] Doutorando em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa
[3] Doutoranda em Energia, Universidade de São Paulo
[4]Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa

Resumo: Este trabalho teve por objetivo a produção e qualificação de *pellets* torrificados com madeira de *Pinus* sp. para geração de energia. Foram realizados cinco tratamento (200°C – 20 min.; 250°C – 10, 20 e 30 min.; 300°C – 20 min.) com duas repetições por tratamento, totalizando 10 unidades amostrais, mais duas unidades amostrais referentes à testemunha (*pellets* não torrificados). O tratamento térmico promoveu diversas modificações nas propriedades dos *pellets*, dentre elas, destacam-se o aumento do poder calorífico superior, redução do diâmetro, diminuição da geração de finos e aumento da durabilidade mecânica. Todos os tratamentos apresentaram resultados satisfatórios e se enquadraram a norma de comercialização, exceto quanto à durabilidade mecânica dos *pellets*. Dentre os tratamentos, o que mais se aproximou da exigência de durabilidade da norma EN 14 961-2 foram os *pellets* submetidos a temperatura de 300° C durante 20 minutos.

Palavras-chave: Tratamento Térmico; Biomassa Energética; EN 14 961-2.

EFFECT OF TORREFICATION ON THE PROPERTIES OF PELLETS PRODUCED WITH *Pinus* sp.

Abstract: The objective of this work was the production and qualification of pellets torrefied with Pinus sp. Five treatments were performed (200 ° C - 20 min, 250 ° C - 10, 20 and 30 min, 300 ° C - 20 min) with two replicates per treatment, totaling 10 sample units plus two sample units (Non-torrified pellets). The thermal treatment promoted several changes in the properties of pellets, among which stands out the increase of the higher heating value, reduced diameter, and some improvement in mechanical properties. All the treatments presented satisfactory results and were in accordance with the marketing standard, except for the mechanical durability of the pellets. Among the treatments, what most approached the requirement of durability of the standard was at 300 ° C and 20 minutes.

Keywords: *Thermal Treatment; Energy Biomass*; EN 14 961-2.

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é composta majoritariamente por combustíveis fósseis que impactam as emissões de gases de efeito estufa e, consequentemente são fator importante do aquecimento global. Em decorrência disso, vários países buscam alternativas energéticas baseadas em fontes renováveis para mudar essa tendência (BRASIL, 2014).

No intuito de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, tem-se buscado novas fontes energéticas, de preferência que sejam renováveis e que possam garantir a sustentabilidade ambiental. A biomassa moderna tem ganhado espaço, sendo obtida a partir de processos industriais que aumentam o conteúdo energético das fontes de biomassa convencionais. Como exemplo tem-se os *pellets*, briquetes e a biomassa submetida ao processo térmico, denominado de torrefação.

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 consequentemente otimizando seu armazenamento e transporte (SHAW et al., 2009; WARAJANONT; SOPONPONGPIPAT, 2013).

A torrefação, por sua vez, 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 o material torrificado de tonalidade parda a escura, gases condensáveis ricos em ácidos orgânicos e os gases não condensáveis compostos principalmente por CO e CO_2 (BERGMAN et al., 2005; NHUCHHEN et al., 2014).

A torrefação é um processo que pode ser realizada em diversos tipos de reatores, sendo influenciado, principalmente, pela temperatura do sistema, tempo de residência no reator e granulometria e umidade da biomassa (NHUCHHEN et al., 2014).

Tanto a peletização quanto a torrefação visam aumentar a densidade energética da biomassa, gerar um combustível mais homogêneo, com menor umidade e que permita a utilização em equipamentos de queima modernos, aumentando sua eficiência. Sendo assim, seria vantajoso unir os dois processos de forma que o produto seja altamente competitivo frente aos combustíveis não renováveis. Dessa forma, este trabalho teve por objetivo avaliar o efeito da torrefação sobre os *pellets* de *Pinus* sp. e avaliar a adequação dos mesmos a norma EN 14 961-2, que rege a comercialização deste produto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Matéria Prima

A madeira de *Pinus* sp. foi previamente transformada em maravalha utilizando uma plaina da marca *Planalto*. Depois a biomassa foi seca ao ar livre até atingir a umidade de aproximadamente 30% para posterior moagem em moinho martelo e produção de partículas. As partículas foram classificadas em peneiras sobrepostas, recolhendo-se a fração que passar pela peneira de 3 mm e ficar retida na de 1 mm.

Após a classificação, as partículas foram secas em estufa de circulação forçada a 103 ± 2°C até atingirem 12% de umidade para produção de *pellets*.

2.2 Produção dos *pellets*

Para produção dos *pellets* foram utilizadas partículas com 12% de umidade, em base seca, com variação de ± 0,5%. A umidade proposta foi estipulada conforme valores observados na literatura para produção de *pellets* de madeira de Pinus.

Os *pellets* foram produzidos em uma prensa peletizadora laboratorial da marca *Amandus Kahl*, modelo *14-175* com capacidade para produção de 30 $kg.h^{-1}$.

A temperatura média de peletização ficou em torno de 100ºC, com variação de ± 3°C. Para atingir essa temperatura em menor tempo, a matriz de peletização foi pré-aquecida em óleo a 200ºC por aproximadamente 30 minutos para posterior montagem na prensa, minimizando o uso de partículas para o aquecimento.

Para alimentação da peletizadora, foi utilizado um sistema composto por um motoredutor, um controlador de velocidade e uma rosca-sem-fim. Para produção dos *pellets* foram instalados, ao longo da rosca-sem-fim, quatro bicos de injeção de vapor produzido por uma autoclave. O vapor injetado estava a uma pressão entre 0,5 a 1 kgf/cm^2.

2.3 Propriedades dos *pellets*

A determinação da umidade dos *pellets* foi feita de acordo com a norma EN 14774-2 (DIN, 2009).

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

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

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, 2010d).

A determinação da dureza (kg) foi feita em um Durômetro para *pellets* da marca *Amandus Kahl*.

2.3 Torrefação

Para o tratamento térmico da madeira e dos *pellets* foi utilizado um torrefador contínuo desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), situado na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

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

O sistema de aquecimento é composto por uma câmara de combustão onde o gás liquefeito de petróleo (GLP) é queimado e o gás quente produzido pela combustão é encaminhado para um cilindro revestido com material isolante que envolve o primeiro estágio do sistema de transporte. O aquecimento da biomassa ocorre de forma indireta por meio da troca de calor com a tubulação metálica.

O sistema de resfriamento, posterior ao de aquecimento, por onde há circulação forçada de água. Uma minibomba submersa faz a água circular de um reservatório para o cilindro e deste para o reservatório, permitindo o reaproveitamento de água através de um circuito fechado.

O sistema de exaustão dos gases se divide em dois - dos gases advindos da câmara de combustão e dos vapores d'água e materiais voláteis produzidos com o tratamento térmico da biomassa. O primeiro é retirado com ajuda de um exaustor elétrico na extremidade oposta a sua entrada. O segundo é retirado por efeito "chaminé" através de duas saídas.

Para controle do tempo de residência do material no torreficador foram empregados 2 temporizadores analógicos que controlaram o motor elétrico. Um dos temporizadores atuou acionando o motor elétrico por aproximadamente 4 segundos (tempo necessário para um a volta completa da rosca-sem-fim) e o outro atuou desligando o mesmo por um tempo determinado. Esses dois tempos em conjunto com o número de voltas da rosca-sem-fim no estágio de aquecimento definiu o tempo de residência do material.

A temperatura foi monitorada através de um termômetro digital de marca *Gulton* e modelo *Gulterm 700-10S*, utilizando termopares tipo J. Foram coletadas temperaturas em três pontos no interior do cilindro de torrefação e 3 pontos no cilindro de aquecimento, além da temperatura de entrada e de saída do gás de aquecimento.

2.4 Delineamento experimental

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e duas repetições, totalizando 12 unidades amostrais, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Delineamento experimental.

Tratamento	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
Testemunha	-	-
200.20	200	20
250.10	250	10
250.20	250	20
250.30	250	30
300.20	300	20

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 aplicou-se o teste Tukey em nível de 5% de significância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades dos *pellets*

Na Tabela 2, observa-se os resultados dos testes realizados com os *pellets* torreficados em função dos tratamentos.

Tabela 2: Propriedades físicas e mecânicas dos pellets torreficados.

TRATAMENTO	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Dureza (Kg)	Densidade a Granel (Kg/m³)	Finos (%)	Durabilidade (%)	PCS (J/g)
Testemunha	6,02 a	18,38 a	30,00 c	618,01 a	0,45 a	95,35 a	4779.00 c
200.20	6,06 a	18,78 a	31,67 bc	602,86 a	0,20 ab	94,90 a	4721.00 c
250.10	6,05 a	18,60 a	31,00 c	601,82 a	0,09 b	96,40 a	4753.00 c
250.20	6,01 a	18,99 a	37,13 ab	601,88 a	0,15 b	94,98 a	4929.50 b
250.30	6,01 a	18,17 a	33,40 abc	566,66 b	0,21 ab	96,35 a	5133.50 a
300.20	6,02 a	19,47 a	37,93 a	563,72 b	0,09 b	96,48 a	5064.50 ab

O aumento do tempo e da temperatura de torrefação causou a redução do diâmetro dos *pellets*. O diâmetro dos *pellets* tende a diminui em função da contração sofrida durante o tratamento térmico. A eliminação dos componentes menos estáveis termicamente que estão presentes na madeira faz com que ocorra um rearranjo na estrutura do *pellet*. Este efeito de diminuição também pode ocorrer devido à menor expansão ocasionada pela redução de sua higroscopicidade,

O comprimento dos *pellets* não foi afetado bruscamente pelo tratamento térmico, ocorrendo apenas uma ligeira redução dos *pellets* torrificados em relação à testemunha, que apresentou média de 19 mm, enquanto os *pellets* torrificados obtiveram média de 18,5 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.

A densidade a granel dos *pellets,* assim como o diâmetro, seguiram a tendência de diminuição com o aumento do tempo ou temperatura de torrefação. A testemunha obteve a maior densidade a granel de todos os tratamentos, com 618,01 Kg/m³, O tratamento a 300°C durante 20 minutos promoveu a maior redução na densidade a granel, correspondendo a 8,78% em comparação com a testemunha, *Pellets* com maior densidade a granel possuem uma maior quantidade de energia por unidade volumétrica, sendo possível o transporte a maiores distâncias e a otimização do espaço de armazenamento (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009),

A redução da densidade a granel é resultado da diminuição da umidade de equilíbrio dos *pellets*, e para os tratamentos mais intensos ocorre também devido à maior perda de massa em relação à contração volumétrica (MAGALHÃES, 2016),

Verifica-se a tendência de aumento da durabilidade para o efeito do tempo de residência, não sendo observado efeito significativo do tempo de torrefação em algumas faixas de temperaturas. O teor de finos reduziu com o aumento da temperatura, apresentando comportamento contrário em relação ao tempo de residência no torrefador. Portanto, a produção de finos foi inversamente proporcional ao aumento de temperatura e diretamente proporcional ao tempo de residência no torrefador.

A dureza mede a resistência à compressão perpendicular ao comprimento dos *pellets,* Observa-se um aumento da dureza com o acréscimo de temperatura no tempo de torrefação de 20 minutos, para as temperaturas de 250 e 300 °C, Os tratamentos de 200°C a 20 minutos e 250°C a 10 minutos diminuíram a dureza dos *pellets*, sendo este valor inferior ao da testemunha. 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* possui grande importância no momento do transporte e armazenamento, as quais são atividades que, em algum momento, são empregadas máquinas para movimentação da massa de material ou, no caso do transporte, que são, constantemente, submetidos a esforços e às condições das estradas (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009).

O poder calorífico também segue uma tendência de aumento com o acréscimo do tempo de residência, principalmente, na temperatura de 250°C. Em contrapartida, foi observado queda de poder calorifico para os *pellets* torrificados a 200 °C durante 20 minutos e 250°C durante 10 minutos. O aumento no poder calorífico superior dos *pellets* torreficados a 300 °C e 20 minutos foi de 7% em comparação à testemunha. O aumento do PCS é devido ao aumento proporcional da lignina em detrimento à eliminação das hemiceluloses é o principal fator a influenciar o acréscimo do poder calorífico.

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.

3.2 Norma de qualidade dos *pellets*

Na tabela 3, 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).

Tabela 3: Classificação dos *pellets* de madeira para uso não industrial, de acordo com a norma de qualidade EN 14 961-2

TRATAMENTO	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Dureza (Kg)	Densidade a Granel (g/m³)	Finos (%)	Durabilidade (%)
Testemunha	✓	✓	✓	✓	✓	×
200°C-20min	✓	✓	✓	✓	✓	×
250°C-10min	✓	✓	✓	✓	✓	×
250°C-20min	✓	✓	✓	✓	✓	×
250°C-30min	✓	✓	✓	×	✓	×
300°C-20min	✓	✓	✓	×	✓	×
NORMA	6 ± 1	3, 5 ≤ C ≤ 40	-	≥ 600	≤ 1	≥ 97,5

✓: diretriz cumprida; ×: diretriz não cumprida,

Todos os tratamentos atenderam à norma quanto ao diâmetro, dureza e porcentagem de finos.

Para a densidade a granel, os tratamentos a 250 °C e 30 minutos e 300° C e 20 minutos não apresentaram resultados satisfatórios, apresentando valor inferior ao estipulado pela norma, devido à maior degradação térmica e consequente perda de massa.

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 na Tabela 2. 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.

3.3 Aspecto visual e colorimetria dos *pellets* torreficados

Na Figura 1, são apresentadas as fotos dos *pellets* em função dos tratamentos térmicos, bem como para a testemunha.

Tratamento	Testemunha	200.20	250.10	250.20	250.30	300.20

Figura 1 - Aspecto visual dos *pellets* em função da temperatura e do tempo de torrefação

Observa-se, na Figura 1, 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, consequentemente, associado com a degradação dos constituintes químicos da madeira.

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

Na Tabela 4, 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 4: Parâmetros da análise de cor e cor estimada para as partículas em função dos tratamentos

Tratamento	L	a	b	Cor Estimada
Testemunha	73.46	9.02	21.34	
200°C - 20min	73.08	7.42	22.96	
250°C - 10min	72.82	7.22	22.42	
250°C - 20min	57.22	8.86	17.16	
250°C - 30min	40.96	10.72	6.2	
300°C - 20min	44.24	8.04	8.7	

Observa-se, na Tabela 4, uma diferença significativa dos parâmetros L 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 torrificado sem depender de análises demoradas.

4. CONCLUSÕES

O tratamento térmico promoveu diversas modificações nas propriedades dos *pellets* de *Pinus* sp,, dentre elas, destaca-se o aumento do poder calorífico superior, 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 mecânica dos *pellets*. Dentre os tratamentos, o que mais se aproximou da exigência de durabilidade da norma foram os *pellets* submetidos a 300° C durante 20 minutos.

5. AGRADECIMENTOS

Ao IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) pelo financiamento dado a este projeto. A Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade. Ao Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM – DEF/UFV) e ao Laboratório de Painéis de Energia da Madeira (LAPEM – DEF/UFV) pela estrutura disponibilizada para realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGMAN, P. C. A.; BOERSMA, A. R.; ZWART, R. W. R.; KIEL, J. H. A. **Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations**. Energy Centre of Netherlands (ECN). Petten, The Netherlands. 2005.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional 2014: ano base 2013. Rio de Janeiro, 2014. 288 p.

_____. **DIN EN 14774-1: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method**. Berlim: CEN**:** 10 p. 2010a.

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

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

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

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.

MAGALHÃES, M. A. **Tratamento Térmico de Partículas e *Pellets* de Madeira em Reator Tipo Rosca Sem Fim.** 2016. 63 f. Dissertação (*Magister Scientiae*) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

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

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 13.0. Tulsa, USA 2015.