

MATHEUS PERDIGÃO DE CASTRO FREITAS PEREIRA

DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA E BIOLÓGICA DE CAVACOS DE
Eucalyptus urophylla

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
2017

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

T

P436d
2017

Pereira, Matheus Perdigão de Castro Freitas, 1992-
Decomposição térmica e biológica de cavacos de
Eucalyptus urophylla / Matheus Perdigão de Castro Freitas
Pereira. – Viçosa, MG, 2017.
viii, 63f : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Benedito Rocha Vital.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Plantas - Efeito da temperatura. 2. Eucalipto -
Biodegradação. 3. Biomassa. 4. Combustão. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal.
Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

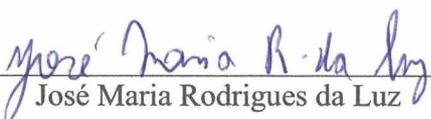
CDO adapt. CDD 22 ed. 634.91422

MATHEUS PERDIGÃO DE CASTRO FREITAS PEREIRA

DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA E BIOLÓGICA DE CAVACOS DE
Eucalyptus urophylla

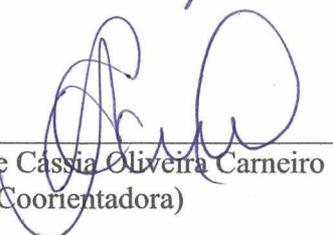
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15 de fevereiro de 2017.


José Maria Rodrigues da Luz


Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho


Vinícius Resende de Castro


Angélica de Cassia Oliveira Carneiro
(Coorientadora)


Benedito Rocha Vital
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as graças concedidas.

Aos meus pais, José Lery e Eliana Maria, pelo amor e incentivo constante nos estudos.

Ao meu irmão Thiago e minha cunhada Helen pelos conselhos e por terem renovado minhas energias, nesta reta final, com a notícia da espera do meu sobrinho Miguel.

Aos meus familiares pelo carinho e apoio.

Ao meu orientador, Professor Benedito Rocha Vital, e minha coorientadora, Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, por terem confiado no meu trabalho e pela presença constante durante todo o desenvolvimento do projeto, sanando dúvidas e orientando os melhores caminhos para realização do experimento.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal e a Capes pela oportunidade de cursar o mestrado.

À banca por aperfeiçoarem a dissertação.

Às Professoras Maria Catarina Megumi Kasuya e Bárbara Luísa Corradi Pereira, e ao pós-doutorando José Maria Rodrigues da Luz, por terem contribuído na realização do ensaio de apodrecimento acelerado por fungos xilófagos.

Ao Professor Paulo Fernando Trugilho e à doutoranda Maíra Reis de Assis, pela realização da análise termogravimétrica e de calorimetria diferencial exploratória.

Ao Professor Jorge Luiz Colodette e ao mestre Gustavo Souza Lima Bittencourt de Souza, pela realização da análise química elementar.

À professora Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho pela análise anatômica das fibras.

Aos funcionários e amigos da família LaPeM, pelos momentos de descontração e pelas ajudas na realização do experimento.

Aos meus amigos de Viçosa e do Prata, por terem feito esta caminhada um pouco mais leve e divertida. Um agradecimento especial à Amana Obolari, que muito contribuiu na realização do experimento.

A todos que torceram e de alguma forma colaboraram para realização deste trabalho, meus agradecimentos.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
1.1. Madeira em cavacos	3
1.2. Produção e estocagem de cavacos.....	3
1.3. Ataque por fungos	4
1.4. Combustão espontânea	5
1.5. Cavacos torrificados	7
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	8
CAPÍTULO I POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i>	
<i>urophylla</i> IN NATURA E TORRIFICADA	14
1. INTRODUÇÃO	15
2. MATERIAL E MÉTODOS	16
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
4. CONCLUSÕES	26
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27
CAPÍTULO II COMBUSTÃO ESPONTÂNEA DE MADEIRA TRATADA	
TERMICAMENTE.....	33
1. INTRODUÇÃO	34
2. MATERIAL E MÉTODOS	36
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4. CONCLUSÕES	44
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
CAPÍTULO III RESISTÊNCIA DE MADEIRA IN NATURA E TORRIFICADA A	
DIFERENTES FUNGOS XILÓFAGOS.....	48
1. INTRODUÇÃO	49
2. MATERIAL E MÉTODOS	50
2.1. Torrefação do material.....	50
2.2. Caracterização química e umidade de equilíbrio higroscópico	51
2.3. Obtenção dos fungos xilófagos	51
2.4. Ensaio de apodrecimento acelerado	52
2.5. Delineamento experimental e análise estatística.....	53

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4. CONCLUSÕES	58
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
CONCLUSÕES GERAIS	63

RESUMO

PEREIRA, Matheus Perdigão de Castro Freitas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Decomposição térmica e biológica de cavacos de *Eucalyptus urophylla***. Orientador: Benedito Rocha Vital. Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

O Brasil é um país que apresenta potencial de expansão de uso e produção de madeira para fins energéticos, entretanto, quando destinada à geração de energia, a madeira apresenta algumas desvantagens como o elevado teor de umidade e o baixo poder calorífico. A fim de minimizar algumas destas características indesejadas, as empresas vêm utilizando a madeira em forma de cavacos para a geração de energia. Os cavacos apresentam alta superfície específica, homogeneidade e maior facilidade em perder a umidade em comparação à madeira em tora, o que aumenta a eficiência energética do sistema, além da possibilidade de mecanização e automação do processo. Entretanto, apenas a transformação da tora em cavacos não é o suficiente para atingir o potencial energético desta biomassa e torná-la competitiva perante as fontes não renováveis. Além disto, quando estocados em pilhas para secagem, os cavacos podem sofrer combustão espontânea ou serem degradados por agentes biológicos, como os fungos xilófagos. Torna-se, então, necessária a utilização de técnicas que melhorem este material, como a torrefação, um tratamento térmico realizado em baixa oxigenação e temperaturas moderadas, que variam entre 200 e 300°C, capaz de acumular carbono e lignina na madeira, tornando-a um material com maior eficiência energética e menor atratividade a microorganismos xilófagos. Assim, este trabalho teve como objetivo principal estudar a influência da temperatura de torrefação na combustão espontânea e degradação biológica de cavacos de eucalipto torrificados, e como objetivo específico obter o potencial energético dos cavacos torrificados. Para realização do estudo, cavacos de madeira foram peneirados e secos em estufa até atingirem massa constante. Em seguida, foram torrificados por 20 minutos nas temperaturas de 180, 220 e 260°C em um torreficador de rosca sem fim, sendo realizadas 3 torrefações por tratamento e utilizando aproximadamente 2 kg de cavacos por repetição. Após a torrefação, determinou-se o rendimento gravimétrico, a dimensão das fibras da madeira, além da composição química estrutural, elementar e imediata, umidade de equilíbrio higroscópico, a densidade a granel, o poder calorífico superior e útil, a densidade energética, a possibilidade de combustão espontânea e a resistência ao ataque de fungos xilófagos dos cavacos de madeira *in natura* e torrificados. O aumento da temperatura de

torrefação ocasionou um aumento de lignina total, carbono elementar e carbono fixo, tendo como consequência o aumento do poder calorífico superior e útil, menor rendimento gravimétrico, menor umidade de equilíbrio higroscópico, maiores resistências a fungos xilófagos e maior estabilidade térmica. A espessura de parede e largura das fibras foram reduzidas com o tratamento térmico. Verificou-se também, que os cavacos de madeira *in natura* e torrificados não são passíveis de combustão espontânea. Recomenda-se a torrefação na temperatura de 260°C devido à maior densidade energética, maior percentual de lignina e maior resistência ao ataque de xilófagos.

ABSTRACT

PEREIRA, Matheus Perdigão de Castro Freitas, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2017. **Thermal and biological decomposition of *Eucalyptus urophylla* chips**. Advisor: Benedito Rocha Vital. Co-advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

Brazil is a country that has the potential to expand the use and production of wood for energy purposes. However, when used for energy generation, wood presents some disadvantages such as high moisture content and low calorific value. In order to minimize some of these unwanted characteristics, companies have been using the wood in the form of wood chips for power generation. The chips have a high specific surface area, homogeneity and easier to lose moisture compared to log wood, which increases the energy efficiency of the system, besides the possibility of mechanization and automation of the process. However, only the transformation of the log into chips is not enough to reach the energy potential of this biomass and make it competitive against non-renewable sources. In addition, when stored in piles for drying, the chips may spontaneously combust or be degraded by biological agents, such as fungi xylophagous. It is then necessary to use techniques that improve this material, such as torrefaction, a low oxygenation heat treatment and moderate temperatures, ranging from 200-300°C, capable of accumulating carbon and lignin in the wood, making it a material with greater energy efficiency and less attractiveness to xylophagous microorganisms. Thus, the main objective of this work was to study the influence of torrefaction temperature on the spontaneous combustion and biological degradation of torrefacted eucalyptus chips, and as a specific objective to obtain the energetic potential of the torrefacted chips. To carry out the study, wood chips were sieved and dried in an oven until reaching a constant mass. They were then torrefacted for 20 minutes at temperatures of 180, 220 and 260 ° C in an endless screw roaster, 3 torrefaction being processed per treatment and using approximately 2 kg of chips per replicate. After torrefaction, the gravimetric yield, the fiber size of the wood, the structural, elemental and immediate chemical composition, hygroscopic equilibrium moisture, bulk density, superior and useful calorific value, energy density, possibility of spontaneous combustion and resistance to the attack of xylophagous fungi of the wood chips in natura and torrefacted. The increase in the torrefaction temperature caused an increase in total lignin, elemental carbon and fixed carbon, resulting in higher and useful calorific increase, lower gravimetric yield, lower hygroscopic equilibrium moisture, higher resistance to xylophagous fungi and greater thermal stability. It has also been found that the in natura and torrefacted wood

chips are not susceptible to spontaneous combustion. It is recommended to torrefaction at a temperature of 260°C due to the higher energy density, higher percentage of lignin and greater resistance to attack by xylophages.

INTRODUÇÃO GERAL

Segundo o Ministério de Minas e Energia - MME (2016), a maior parte da oferta de energia interna brasileira advém de fontes não renováveis como o petróleo, gás natural e carvão mineral, contudo, aproximadamente 41,2% da geração de energia no Brasil são oriundas de fontes renováveis, um valor bem acima da média mundial que gira em torno de 14,3%.

A biomassa florestal na forma de lenha e derivados como *pellets*, briquetes, cavacos *in natura*, cavacos torreficados e o carvão vegetal, é uma importante fonte de combustível para geração de energia, sendo responsável por aproximadamente 20% de toda energia renovável gerada no país (MME, 2016). Esta participação poderia ser maior visto a alta demanda energética e o potencial brasileiro de expansão de uso e produção de madeira para fins energéticos, com condições edafoclimáticas que favorecem o rápido crescimento de algumas espécies, como o eucalipto (PREVEDELLO et al., 2013; CUNHA et al., 2015).

Segundo Dutta e Leon (2012) a madeira possui algumas características que diminuem sua eficiência como combustível, das quais cita-se o elevado teor de umidade, baixa densidade, baixo poder calorífico, baixo teor de carbono, associado ao fato de ser um material heterogêneo e higroscópico. A fim de minimizar algumas destas características indesejadas, as empresas do setor energético vêm utilizando a madeira em forma de cavacos para a geração de energia.

Em especial a utilização de madeira na forma de cavacos, tem-se observado um aumento do consumo nos últimos anos. Segundo dados da AGROICONE (2015), a exportação brasileira de cavacos que em 2009 era de aproximadamente 1 milhão de toneladas, em 2014 foi superior a 1,3 milhões de toneladas, um crescimento próximo a 30%. No Estado de São Paulo, segundo Lopes et al. (2016), aproximadamente 80% das cerâmicas de porte médio substituíram a madeira em tora pela biomassa em forma de cavacos, representando de forma bastante significativa a realidade energética do setor.

Os cavacos apresentam boas características energéticas, como, maior superfície específica, maior reatividade (COSTA et al., 2010), homogeneidade e maior facilidade em perder a umidade em comparação à madeira em tora, o que aumenta a eficiência energética do sistema, além da possibilidade de mecanização e automação do processo. Entretanto, apenas a transformação da tora em cavacos não é o suficiente para atingir o potencial energético desta biomassa e torná-la competitiva perante as fontes não renováveis. Além disto, quando estocados em pilhas para secagem, os cavacos podem

sofrer redução de massa resultando em menor massa específica básica, degradação microbiológica, aumento do teor de cinzas e combustão espontânea das pilhas de cavacos (BRAND et al. 2014; ALAKOSKI et al. 2015).

Assim, é necessário melhorar as características indesejáveis dos cavacos de madeira para aumentar o seu potencial energético, bem como a sua competitividade. Uma alternativa é a torrefação, um tratamento térmico em temperaturas controladas (200 a 300°C) e em baixa oxigenação, capaz de acumular lignina e carbono no material, resultando em uma biomassa com maior densidade energética, menor higroscopicidade e menor atratividade à microorganismos decompositores (VAN DER STELT et al., 2011, LORA et al., 2013, SHANG et al., 2014).

Ela se diferencia da carbonização por ocorrer em temperaturas mais baixas e por apresentar um rendimento gravimétrico maior, com conservação da energia e remoção incompleta de materiais voláteis na biomassa (MATALI et al., 2016). Vidal e Hora (2011) explicam que em uma torrefação típica, 70% da massa permanece como produto sólido conservando 90% da energia inicial, e os outros 30% são formados por gases que contêm apenas 10% do conteúdo energético da biomassa.

As propriedades da madeira torrificada variam principalmente em função do tempo e da temperatura final do processo, velocidade de aquecimento e das propriedades iniciais da madeira (BERGMAN et al., 2005; RODRIGUES, 2009). Felfli et al. (2003) relataram que a temperatura de torrefação tem maior influência no processo que o tempo de residência da biomassa no reator. Assim, a escolha da temperatura final utilizada dependerá do grau de modificação da madeira e do rendimento gravimétrico que se pretende obter no produto final (PINCELLI et al., 2002; MENDES, 2010; PEREIRA et al., 2016).

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

- **Capítulo I:** Potencial energético da madeira de *Eucalyptus urophylla in natura* e torrificada
- **Capítulo II:** Combustão espontânea de madeira tratada termicamente
- **Capítulo III:** Resistência de madeira *in natura* e torrificada a diferentes fungos xilófagos

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. Madeira em cavacos

Os cavacos de madeira também conhecidos como Woodchips são pequenos pedaços de madeira cuja qualidade, segundo Ceragioli (2013), depende da matéria prima e da tecnologia utilizada para sua produção. A utilização de máquinas picadoras para produção de cavacos possibilita a padronização do seu tamanho, permitindo a adequação destes produtos aos queimadores de combustíveis sólidos já existentes no mercado.

Gonçalves (2000) citado por Lima e Silva (2005) explica que vários fatores durante o processamento da madeira influenciam a qualidade dos cavacos, como afiação e ângulos de saída das ferramentas de corte, tipo e superfície da madeira a ser trabalhada e o teor de umidade da madeira processada.

Os cavacos apresentam boas características energéticas, como, maior superfície específica, maior reatividade (COSTA et al., 2010), homogeneidade e maior facilidade em perder a umidade em comparação à madeira em tora, o que aumenta a eficiência energética do processo. Os cavacos de madeira podem ser utilizados como insumo para a geração de energia térmica em fornos e caldeiras, cerâmicas, laticínios, frigoríficos, indústrias esmagadoras de grãos, armazéns, entre outras.

Segundo Valverde et al. (2012), os cavacos de madeira são competitivos quando comparados aos derivados do petróleo, podendo contribuir para uma redução de aproximadamente 50% dos custos de produção de vapor e energia. Entretanto, estes autores complementam que a falta de uma política governamental que estimule a substituição tecnológica dos equipamentos (caldeiras) nas indústrias e a facilidade no manuseio dos combustíveis fósseis têm dificultado a expansão do mercado de cavacos.

1.2. Produção e estocagem de cavacos

A estocagem da madeira na forma de cavacos já é usual desde 1930 nos países nórdicos e apresenta uma série de vantagens, como, a facilidade de transporte, estocagem e manuseio da madeira; redução de mão-de-obra no pátio de madeira; possibilidade de maior uniformização do material fornecido no processo industrial (ZVINAKEVICIUS et al., 1978) e maior facilidade de secagem devido a maior superfície específica.

Segundo Brand et al. (2014), o tempo de estocagem exerce influência nas

propriedades físicas, químicas e energéticas da biomassa, sendo modificações mais intensas e rápidas observadas em partículas menores (cavacos) quando comparados com a biomassa de maiores dimensões (toras e árvores inteiras).

Outros fatores que exercem influência nas propriedades da biomassa estocada são a dimensão, forma e inclinação das pilhas de cavacos, a temperatura do ambiente, a ação fúngica e bacteriana no material e o teor de umidade no momento da confecção das pilhas (ALALOSKI et al. 2015).

Dentre as desvantagens de se estocar os cavacos de madeira em pilhas, temos a redução de massa do material resultando em menor massa específica básica, o aumento do teor de cinzas, a degradação microbiológica e a possibilidade de combustão espontânea (BRAND et al. 2014; ALAKOSKI et al. 2015).

1.3. Ataque por fungos

Por causa da sua constituição química e estrutura anatômica, a madeira está sujeita a deterioração por vários organismos biodegradadores, sendo os fungos os xilófagos mais comuns, que devido ao seu aparato enzimático são capazes de degradar macromoléculas transformando-as em moléculas menores (SILVA, 2014b).

Devido à sua diversidade, os fungos são capazes de crescer em vários locais, agindo na árvore viva, na matéria-prima confeccionada e até mesmo em pilhas de cavacos de madeira autoaquecidas, decompondo totalmente a madeira ou apenas causando manchas, sendo assim classificados como apodrecedores, emboloradores e manchadores (ROCHA, 2001; AUER, 2007; SILVA, 2014b).

Segundo Clausen (2010), os fungos emboloradores e manchadores são responsáveis principalmente por alterações na superfície da madeira, causando poucas alterações nas propriedades mecânicas, em contrapartida, os fungos apodrecedores podem degradar moléculas da parede celular, resultando em alterações nas propriedades físicas e mecânicas das madeiras, e são classificados em podridão branca, parda ou mole.

A podridão branca é causada por alguns fungos do filo Basidiomycota que decompõem, proporcionalmente, tanto a celulose e hemiceluloses quanto a lignina, deixando a madeira clara ou descolorida (OLIVEIRA et al., 2005).

A podridão parda também é causada por alguns fungos do filo Basidiomycota que degradam os polissacarídeos da parede celular, conferindo à madeira um aspecto pardo-escuro devido à presença residual da lignina (OLIVEIRA et al., 2005).

A podridão mole é causada por fungos pertencentes ao filo Ascomycota e Deuteromycota que afetam principalmente a superfície externa da madeira, sendo

caracterizada por um amolecimento (OLIVEIRA et al., 1986; CLAUSEN, 2010). Estes fungos degradam a celulose e hemiceluloses e se diferenciam dos fungos da podridão parda por não conseguirem atingir tão profundamente a parede celular (COSTA, 2014).

Segundo Lepage (1986), a atuação desses fungos na madeira pode comprometer o uso final do produto, visto que altera a composição química, modifica a cor natural, reduz a massa e a resistência mecânica, aumento a permeabilidade e a facilidade ao ataque de insetos xilófagos.

Carvalho et al. (2015) estudaram o ataque do fungo de podridão parda *Gloeophyllum trabeum* e de podridão branca *Trametes versicolor* em 3 espécies de eucalipto e na espécie *Hovenia dulcis*. Estes autores encontraram maiores perdas de massa para a espécie *Hovenia dulcis* (47,97%) indicando menor resistência desta espécie comparada ao eucalipto, que obteve maior perda de massa igual a 32,49%. Silva et al. (2014c), estudando a resistência de três madeiras de *Eucalyptus* spp. submetidas ao ataque de 12 fungos, observaram perdas de massa de até 48,64% no alburno e de 34,88% no cerne. Estas perdas de massa podem comprometer a viabilidade técnica e econômica de utilização do material.

Sendo assim, é importante que a madeira possua resistência ao ataque de organismos xilófagos. Essa característica é inerente de cada espécie arbórea devido aos componentes químicos e estruturais próprios de cada indivíduo, sendo que madeiras que apresentam elevado grau de resistência natural são reconhecidas pela maior valorização, conferindo ampla utilização, e conseqüentemente tornando-se mais demandadas no mercado (SILVA, 2014b).

1.4. Combustão espontânea

O autoaquecimento é o primeiro passo de um processo que pode resultar em combustão espontânea, sendo um problema que tem sido observado em diferentes situações para qualquer material que pode decompor-se ou ser oxidado pelo ar (BABRAUSKAS, 2003 e IEA BIOENERGY, 2013).

Garstang et al. (2002) explicam que vários fatores podem afetar a taxa de aquecimento das pilhas de cavacos de madeira, dos quais cita-se a altura da pilha, o baixo fluxo de ar e a presença de impurezas. Eles afirmam que quanto mais alta uma pilha de cavacos, maior o potencial de combustão espontânea. Uma possível explicação para este fato é que pilhas de cavacos altas possuem baixas taxas de circulação, dissipando o calor lentamente.

A umidade da madeira é outro fator que pode afetar o risco de combustão

espontânea do material. Para teores elevados de umidade na madeira, a água pode aquecer e aumentar a temperatura da pilha de cavacos ou pode evaporar, limitando o autoaquecimento (KRAUSE, 2009). Segundo este mesmo autor, o aumento do teor de água na madeira acima de 16% pode iniciar processos biológicos, como a colonização por bactérias e fungos, resultando no aquecimento da pilha. Para materiais secos, a adição de água pode provocar aumento da temperatura devido ao calor gerado no processo de adsorção (IEA BIOENERGY, 2013).

Com a combustão espontânea o material é queimado indesejadamente, ocasionando perda de massa e/ou incêndios que podem alastrar-se. Além disto, ocorre a emissão de partículas finas para a atmosfera, podendo provocar problemas de saúde e outras reações adversas na população (RECH, 2002).

Atualmente no Brasil, o carvão vegetal é considerado um produto sujeito à combustão espontânea, sendo enquadrado na classe de risco 4.2 da Resolução da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT (2004). Assim sendo, a ANTT determina que o transporte viário do carvão vegetal seja realizado em transportadores devidamente identificados e sinalizados, conforme a ABNT NBR 7500 (2004). Entretanto, o material é dispensado desta legislação caso passe por um teste da United Nations – ONU (2009) que comprova que a substância não está sujeita à combustão espontânea.

A exigência deste teste ou do transporte especial para o carvão vegetal implica em um custo extra para os produtores de carvão e é vista como empecilho para realização do transporte e exportação do produto, prejudicando e enfraquecendo o setor.

Apesar de a ANTT determinar que o carvão vegetal deva passar pelo teste de combustão espontânea, pesquisadores científicos têm questionado esta decisão, afirmando que este produto não é passível deste fenômeno. Rohde (2007) afirma que o único fundamento para classificar o carvão vegetal como substância sujeita a combustão espontânea é a temperatura em que o material entra em ignição e a interação do produto com a temperatura ambiente. Para a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a temperatura de ignição do carvão vegetal está entre 315,8 a 399,2°C, ou seja, em temperaturas muito acima da temperatura ambiente.

Neste sentido, salienta-se que grande parte dos incêndios causados em caminhões que transportam carvão vegetal ocorre devido ao mau manuseio do material, que é colocado ainda quente no caminhão.

1.5. Cavacos torreficados

A torrefação é um tratamento térmico no qual a madeira é aquecida a temperaturas moderadas (200 a 300°C) em uma atmosfera com baixa oxigenação, formando um produto intermediário entre a madeira *in natura* e o carvão vegetal (VIDAL e HORA, 2011).

O objetivo da torrefação é elevar o potencial energético do material, através da concentração do carbono na biomassa, retenção dos compostos de maior poder calorífico no produto e diminuição da higroscopicidade, resultando em um produto com maior estabilidade dimensional e maior resistência à degradação por xilófagos (FELFLI, 2003; BARRETO, 2008; SANTOS, 2012; DUTTA e LEON, 2012).

As propriedades da madeira torreficada variam principalmente em função do tempo de residência e da temperatura final do processo, velocidade de aquecimento e das propriedades iniciais da madeira (BERGMAN et al., 2005; RODRIGUES, 2009). Felfli et al. (2003) relataram que a temperatura de torrefação tem maior influência no processo que o tempo de residência da biomassa no reator. Assim, a escolha da temperatura final utilizada dependerá do grau de modificação da madeira que se pretende obter no produto final (PINCELLI et al., 2002; MENDES, 2010).

A torrefação, segundo Nhuchhen et al. (2014) pode ser dividida em quatro etapas básicas sendo elas: 1) secagem da biomassa, sendo retirada apenas a água livre e de adesão; 2) remoção da água de constituição presente nas ligações e também alguns hidrocarbonetos; 3) torrefação propriamente dita com a liberação de parte dos compostos voláteis; 4) resfriamento à temperatura ambiente do material torreficado.

Atualmente, os principais modelos de reatores disponíveis no mercado para realização da torrefação são dos tipos: tambor rotativo, múltiplos fornos, rosca sem fim, micro-ondas, leito fluidizado e correia transportadora oscilante (KLEINSCHMIDT, 2011). Segundo Silva (2014a), dentre as rotas principais de consumo da madeira torreficada tem-se o uso direto para geração de energia na co-combustão com o carvão pulverizado e a associação com outros tratamentos ou rotas de conversão, como a peletização e a gaseificação, o que agrega maior valor ao produto final.

Pereira et al. (2016) torreficando cavacos de madeira de eucalipto em diferentes temperaturas, observaram que a 300°C tem-se aumento de lignina e poder calorífico superior, respectivamente, em 107 e 7,38%, comparado à testemunha. Entretanto, estes mesmos autores recomendaram a torrefação na temperatura de 250°C, por apresentar maior rendimento gravimétrico e maior densidade energética.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7500:2003: identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos.** Rio de Janeiro, 2004.

AGROICONE. Oportunidades para florestas energéticas na geração de energia no brasil. **Relatório final.** Curitiba-PR, 2015. Disponível em: <<http://www.inputbrasil.org/wp-content/uploads/2015/11/Oportunidades-Para-Florestas-Energ%C3%A9ticas-Na-Gera%C3%A7%C3%A3o-De-Energia-No-Brasil-1.pdf>>. Acesso em: 17 de jan de 2017.

ANTT - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Resolução ANTT N° 420/02/2004.** Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/1420/Resolucao_420.html> Acesso em: 20 dez 2016.

ALAKOSKI, E.; JAMSÉN, M.; AGAR, D.; TAMPIO, E.; WIHERSAARI, M. From wood pellets to wood chips, risks of degradation and emissions from the storage of woody biomass – A short review. **Renewable and Sustainable Energy, Reviews**, v. 54, p. 376–383, 2016.

AUER, C. G. Growth and germination of some thermophilic fungi isolated from eucalypt wood chips. Notas científicas. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 54, p. 149-152, 2007.

BABRAUSKAS, V. **Ignition Handbook.** Issaquah, WA, USA: Fire Science Publishers. 2003.

BARRETO, E. J. F. Tecnologias de energias renováveis: sistemas híbridos, pequenos aproveitamentos hidroelétricos, combustão e gasificação de biomassa sólida, biodiesel e óleo vegetal *in natura*. **Brasília: Ministério de Minas e Energia**, 156 p. 2008.

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.**

Petten, Netherlands: ECN, Netherlands. 51p. 2005.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; BRITO, J. O.; QUIRINO, W. F. Influência das dimensões da biomassa estocada de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden na qualidade do combustível para geração de energia. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 175-183, 2014.

CARVALHO, D. E.; SANTINI, E. J.; GOUVEIA, F. N.; ROCHA, M. P. Resistência natural de quatro espécies florestais submetidas a ensaio com fungos apodrecedores. **Floresta Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 271-276, 2015.

CERAGIOLI, N. S. **Qualidade de cavacos produzidos em sistemas florestais de curta rotação de eucalipto para fins energéticos**. 2013. 56 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas Campus de Botucatu, Botucatu, 2013.

CLAUSEN, C. A. Biodeterioration of wood. In: ROSS, R.J. **Wood handbook: wood as an engineering material**. ed. Madison: USDA, p. 312-327, 2010.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Lista completa de todos os produtos químicos**. Disponível em: <http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/produto_consulta_completa.asp?qualpagina=1&sqlQuery=sp_TBP RODIDENTIFICACAO_sel> Acesso em: 20 dez 2016.

COSTA, D. R.; FILHO, D. O.; COSTA, J. M.; FILHO, A. F. L.; TEIXEIRA, C. A. Consumo específico de energia no processamento de madeira em cavacos de um picador (estudo de caso). In: **Engenharia na Agricultura**, Viçosa – MG. v. 18, n. 2, p. 171-177, 2010.

COSTA, L. G. **Seleção de fungos com capacidade de degradação de tocos de *Eucalyptus* spp. para utilização na destoca biológica**. 2014. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.

CUNHA, A. B. D., BRAND, M. A., SIMÃO, R. L., MARTINS, S. A., ANJOS, R. A. M. D., SURDI, P. G., & SCHIMALSKI, M. B. Determination of yield of raw material of *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage by different sawing methods. **Revista Árvore**, v. 39, n. 4, p. 733-741, 2015.

DUTTA, A.; LEON, M. A. **Pros and cons of torrefactino of Woody biomass**. University of Guelph. 2012

FELFLI, F. E. F. **Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado**. 2003. 137 p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) Campinas: Faculdade de Engenharia mecânica, UNICAMP, 2003.

GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT, D. Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, nonventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices. FES B/W2/00716/REP, DTI/Pub URN 02/1535, **First Published**, 2002.

IEA BIOENERGY. Health and Safety Aspects of Solid Biomass Storage, Transportation and Feeding. **Produced by IEA Bioenergy** Task 32, 36, 37 and 40, May 2013

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

KRAUSE, U., ed. Fires in Silos - Hazards, Prevention, and Fire Fighting. 2009, **Wiley-VCH**.

LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v. 1, 342 p

LIMA, E. G.; SILVA, D. A. Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no pólo moveleiro de Arapongas-PR. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 35, n. 1, p. 105-116, 2005.

LOPES, G. A.; BRITO, J. O.; DE MOURA, L. F. Uso energético de resíduos madeireiros na produção de cerâmicas no estado de São Paulo. **Ciência Florestal**, Santa

Maria, v. 26, n. 2, p. 679-686, 2016. ISSN 0103-9954

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; ANDRADE, R. V. Torrefação de madeira. **In: Bioenergia & Biorrefinaria - Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Editores: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. Viçosa, MG. 2013. Pág 401–427.

MATALI, S.; RAHMAN, N. A.; IDRIS, S. S.; YAACOB, N.; ALIAS, A. B. Lignocellulosic biomass solid fuel properties enhancement via torrefaction. **Procedia Engineering**, v. 148, p. 671-678, 2016.

MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2010. 115 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Resenha energética brasileira – Exercício de 2015**, Ed. de maio de 2016.

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

OLIVEIRA, A. M. F. et al. Agentes destruidores da madeira. **In: LEPAGE, E.S.** (Coord.). Manual de preservação de madeiras. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, v. 1, p. 99–256, 1986.

OLIVEIRA, J. T. S. et al. Influência dos extrativos na resistência ao apodrecimento de seis espécies de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 819-826, 2005.

PAES, J. B.; MEDEIROS NETO, P. N.; LIMA, C. R.; FREITAS, M. F.; DINIZ, C. E. F. Efeitos dos extrativos e cinzas na resistência natural de quatro madeiras a cupins xilófagos. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 399-405, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602013000300006>.

PEREIRA, M. P. C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; OLIVEIRA, A. C. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v.36, n.87, p. 269-275, 2016.

PINCELLI, A. L. P. S., BRITO, J. O., CORRENTE, J. E. Avaliação da termorretificação sobre colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.61, p.122- 132, 2002.

PREVEDELLO, J.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; VOGELMANN, E. S.; FONTANELA, E.; REICHERT, J.M. Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em Argissolo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 129-138, 2013.

RECH, C. Estudo sugere uso de serragem como insumo. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 66, 2002.

ROCHA, M. P. Biodegradação e preservação da madeira. 5. ed. Curitiba: **Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná**, 2001. 94 p. (Série Didática, 01/01).

RODRIGUES, T. O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ROHDE, G. M. O mito da combustão espontânea do carvão vegetal. **Revista da madeira**. Ed. nº106, 2007.

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e de bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado Ciências, Programa: Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SHANG, L.; AHRENFELDT, J.; HOLM, J. K.; BACH, L. S.; STELTE, W.; HENRIKSEN, U. B. Kinetic model for torrefaction of wood chips in a pilot-scale continuous reactor. **In: Journal of analytical and applied pyrolysis**. 108, 109-116, 2014.

SILVA, C. M. S. **Efeito da temperatura de torrefação nas propriedades energéticas da madeira de eucalipto**. 2014. 41p. Monografia de graduação (Engenheiro Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014a.

SILVA, B. N. A. **Seleção de fungos apodrecedores de madeira e caracterização de basidiomicetos associados à podridão de árvores vivas**. 2014. 92p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014b.

SILVA, L. F.; PAES, J. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; FURTADO, E. L.; ALVES, F. R. Deterioração da madeira de *Eucalyptus* spp. por fungos xilófagos. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 393-400, 2014c.

UNITED NATIONS, Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Manual of tests and criteria. **Fifth revised edition**. New York and Geneva, 2009.

VALVERDE, S. R.; MAFRA, J. W. A.; MIRANDA, M. A., SOUZA, C. S.; VASCONCELOS, D. C. **Silvicultura brasileira- oportunidades e desafios da economia verde**. 2012. Disponível em: <<http://fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-549.pdf>>. Acesso em: 16 de jan de 2017.

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, p. 3748 – 3762, 2011.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 33, p. 261-314, mar. 2011.

ZVINAKEVICIUS, C.; FOELKEL, C. E. B.; ANDRADE, J. R. Influência da temperatura de armazenamento de cavacos de eucalipto na qualidade da madeira e da celulose kraft, **Artigo técnico**. Cenibra S.A. Nov. 1978.

CAPÍTULO I

POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE *Eucalyptus urophylla* IN NATURA E TORRIFICADA

RESUMO – A torrefação, ou pré-carbonização, é um tratamento térmico realizado em baixa oxigenação e temperaturas moderadas, que variam entre 200 e 300°C, capaz de acumular carbono na madeira, tornando-a um material com maior densidade energética e menor higroscopicidade. Deste modo, esse trabalho teve como objetivo avaliar a influência da temperatura de torrefação nas propriedades físicas e químicas de cavacos de *Eucalyptus urophylla*. Para realização do estudo, cavacos de madeira foram peneirados e secos em estufa até atingirem massa constante. Em seguida, foram torreficados por 20 minutos nas temperaturas de 180, 220 e 260°C em um torreficador de rosca sem fim, sendo realizadas três torrefações por tratamento e utilizando aproximadamente 2 kg de cavacos por repetição. Após a torrefação, analisou-se as propriedades anatômicas das fibras, o rendimento gravimétrico, a composição química estrutural, elementar e imediata, além da umidade de equilíbrio higroscópico, a densidade a granel, o poder calorífico superior e útil e a densidade energética dos cavacos de madeira *in natura* e torreficados. O aumento da temperatura de torrefação ocasionou um aumento no teor de lignina total, carbono elementar e carbono fixo, tendo como consequência o aumento do poder calorífico superior e útil, menor rendimento gravimétrico e menor umidade de equilíbrio higroscópico. Observou-se também menor espessura de parede e largura das fibras nos cavacos de madeira torreficados em maiores temperaturas. Em geral, a torrefação melhorou o potencial energético da madeira, sendo o tratamento a 260°C o mais indicado, devido à maior densidade energética.

Palavras-chave: tratamento térmico, torrefação, cavacos de madeira

ENERGY POTENTIAL OF *Eucalyptus urophylla* IN NATURA WOOD AND TORREFIED

ABSTRACT – The torrefaction, or pre-carbonization, is a thermal treatment carried out in low oxygenation and moderate temperatures, varying between 200 and 300°C, able to accumulate carbon in the wood, making it a material with higher energetic density and lower hygroscopicity. Thus, this work had as objective to evaluate the influence of the torrefaction temperature on the physical and chemical properties of *Eucalyptus urophylla* chips. To carry out the study, wood chips were sieved and dried in an oven until reaching a constant mass. They were then torrefied for 20 minutes at temperatures of 180, 220 and 260°C in an endless roaster, three torrefaction being processed per treatment and using approximately 2 kg of chips per replicate. After torrefaction, the anatomical properties of the fibers, the gravimetric yield, the structural, elemental and immediate chemical composition, besides the hygroscopic equilibrium moisture, the bulk density, the high and useful calorific value and the energy density of the chips were analyzed of wood in natura and torrefieds. The increase in the torrefaction temperature caused an increase in total lignin content, elemental carbon and fixed carbon, resulting in higher and useful calorific increase, lower gravimetric yield and lower hygroscopic equilibrium moisture. It was also observed lower wall thickness and fiber width in the torch chips in higher temperatures. In general, the torrefaction improved the energy

potential of the wood, with the treatment at 260°C being the most indicated due to the higher energy density.

Keywords: heat treatment, torrefaction, wood chips.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que apresenta potencial de expansão de uso e produção de madeira para fins energéticos, devido à alta demanda energética e à suas condições edafoclimáticas que favorecem o rápido crescimento de algumas espécies, como o eucalipto (PREVEDELLO et al., 2013; CUNHA et al., 2015).

Entretanto, quando destinada à geração de energia, a madeira apresenta algumas desvantagens como o elevado teor de umidade, baixo poder calorífico e baixo teor de carbono fixo, além de ser um material heterogêneo e higroscópico (BRAND et al., 2013; NONES, et al., 2014; ZANUNCIO et al., 2015). No entanto, grande parte destas características pode ser melhorada com a torrefação do material.

A torrefação é um tratamento térmico, também conhecido como pré-carbonização, em que a biomassa é aquecida em atmosfera inerte ou de baixa oxigenação, entre 200 e 300°C de temperatura, promovendo a homogeneização e melhoria das propriedades energéticas da biomassa (VAN DER STELT et al., 2011; BATIDZIRAI et al. 2013; SHANG et al., 2014). Ela se diferencia da carbonização por ocorrer em temperaturas mais brandas e por apresentar um rendimento gravimétrico elevado, com conservação da energia e remoção incompleta de materiais voláteis na biomassa (MATALI et al., 2016). Em uma torrefação típica, 70% da massa permanece como produto sólido conservando 90% da energia inicial, e os outros 30% são formados por gases que contêm apenas 10% do conteúdo energético da biomassa (VIDAL e HORA, 2011).

Na torrefação, tanto o tempo de residência quanto a temperatura final do processo exercem influência nas características finais da biomassa, sendo que, normalmente, quanto maiores forem estas variáveis maior será o poder calorífico do material (STRANDBERG et al., 2015). Estes autores complementam que a temperatura de torrefação exerce maior influência que o tempo de residência do material no reator.

Dentre as melhorias promovidas pela torrefação, destacam-se o aumento da densidade energética e a diminuição do teor de umidade, resultando em um material com características químicas e físicas que potencializam a geração de energia, permitem o transporte a longa distância e o armazenamento em longo prazo (NA et al., 2013;

CHEN et al., 2014; SHANG et al., 2014, PEREIRA et al., 2016a).

Apesar do processo de torrefação ser estudado na França desde 1930, esta técnica ainda é considerada apenas uma tecnologia promissora, necessitando de estudos que determinem as melhores condições de torrefação a fim de potencializar o uso da madeira como combustível e a mercantilização desta biomassa (VAN DER STELT et al., 2011; BATIDZIRAI et al. 2013).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi o potencial energético da madeira de *Eucalyptus urophylla in natura* e torrificada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado com cavacos de madeira de *Eucalyptus urophylla*, de aproximadamente 7 anos de idade, provenientes de plantios experimentais da Universidade Federal de Viçosa. Os cavacos de madeira foram peneirados, sendo utilizados no experimento aqueles que ficaram retidos na peneira de 16 mm e passaram na peneira de 31,5 mm. Após a classificação, os cavacos foram secos em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingirem massa constante, ou seja, 0% de umidade em base seca. Posteriormente, os cavacos foram torrificadas por 20 minutos nas temperaturas de 180, 220 e 260°C .

Para a torrefação utilizou-se um reator tipo rosca sem fim desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, conforme descrito por Magalhães (2016). O reator consiste de quatro componentes básicos: sistema de transporte de biomassa, de aquecimento, de resfriamento e de exaustão dos gases. A temperatura de torrefação foi monitorada por meio de um termômetro digital de marca *Gulton* e modelo *Gulterm 700-10S*, utilizando oito termopares tipo J.

Para determinar o rendimento gravimétrico, que é a massa de material final (torrificado) em relação à massa inicial, dado em porcentagem, os cavacos de madeira foram pesados antes e após o tratamento térmico, a fim de conhecer a perda de massa no processo.

Para obter os parâmetros anatômicos das fibras, primeiramente confeccionou-se o macerado do material, onde finas frações foram retiradas dos corpos de prova e inseridas em uma solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial em um tubo de ensaio, conforme preconizado por Dadswell (1972). A mistura foi mantida em estufa a 60°C , durante setenta e duas horas, até a completa dissociação da madeira. As fibras já

individualizadas foram coloridas com o corante azul de astra e em seguida o material foi armazenado em água destilada. Posteriormente, foram montadas lâminas temporárias para mensuração das fibras. Foram determinados o comprimento (mm), a largura (μm) e a espessura da parede (μm) de trinta fibras de cada tratamento através do software Axio-Vision®. Empregando-se um microscópio de luz o comprimento foi medido utilizando a objetiva de 5X, já a largura e a espessura da parede foram medidas utilizando a objetiva de 20X.

A composição química imediata do material torreficado e *in natura* foi determinado de acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), com algumas adaptações, para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

Para determinação da composição química estrutural amostras de cavacos foram moídos e peneirados na granulometria entre 40 e 60 mesh, conforme preconizado pela American Society for Testing and Materials - ASTM (1982). Segundo as normativas da TAPPI (1996) determinou-se o teor de extrativos totais. O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). O percentual de lignina solúvel foi determinado por espectrometria conforme Goldschimid (1971). O teor de lignina total foi obtido através da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holoceluloses (celulose + hemiceluloses) foi obtido pela diferença entre o somatório dos teores de lignina total, extrativos e cinzas com o total de 100%.

A composição elementar (carbono, nitrogênio, hidrogênio) foi determinada de acordo com o preconizado por Deutsches Institut für Normung - DIN EN 15104 (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).

Para a determinação da Umidade de Equilíbrio Higroscópico (UEH) as amostras foram climatizadas a 20 °C e 65 % de umidade relativa até atingir massa constante. A umidade foi calculada em base seca.

A densidade a granel foi obtida preenchendo um recipiente com volume interno conhecido com as amostras de cavacos de cada tratamento, seguindo as normativas da EN 15103 (DIN, 2010b). O cálculo da densidade a granel foi feito dividindo a massa da amostra (kg) pelo volume interno da caixa (m^3).

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado em uma bomba calorimétrica, seguindo a norma EN 14918 (DIN, 2010a) utilizando uma bomba calorimétrica

adiabática IKA300®.

A densidade energética (Kcal/m³) foi obtida por meio da multiplicação do poder calorífico útil (Kcal/kg) pela densidade a granel (Kg/m³). O poder calorífico útil (PCU) foi estimado pelas fórmulas:

$$(i) \text{ PCU} = [\text{PCI}(1 - u)] - (600u)$$

$$(ii) \text{ PCI} = \text{PCS} - [600(9H/100)]$$

Onde: H: Hidrogênio (%); u: Umidade de equilíbrio higroscópico, PCI: Poder Calorífico Inferior (Kcal/kg);

O valor da densidade energética foi multiplicado por 0,00419, para sua conversão em MJ.m⁻³.

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, contendo a testemunha mais 3 tratamentos (temperaturas), em três repetições, totalizando 12 unidades amostrais: Testemunha, 180°C, 220°C e 260°C.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas diferenças significativas entre os tratamentos, aplicou-se o teste Tukey, a 5% de significância, utilizando o software STATISTICA 8.0 (STATSOFT, 2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios das propriedades anatômicas das fibras da madeira *in natura* e torrificada.

Tabela 1 – Valores médios do comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras da madeira *in natura* e torrificada

Parâmetros	Temperatura de torrefação			
	<i>In natura</i>	180°C	220°C	260°C
Comprimento (mm)	0,93 a	1,00 a	0,98 a	0,99 a
Largura (µm)	24,07 a	22,16 ab	21,13 b	20,42 b
Diâmetro do lume (µm)	8,25 b	8,34 b	11,39 a	11,67 a
Espessura da parede (µm)	7,91 a	6,91 b	5,38 c	4,38 d

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem significativamente entre si (Tukey p > 0,05)

Observa-se que as dimensões das fibras foram modificadas significativamente pelo tratamento térmico, exceto o comprimento.

Nota-se que a largura das fibras diminuiu com o aumento da temperatura de torrefação, sendo reduzida em 12,21 e 15,16%, respectivamente, nos tratamentos a 220 e 260°C quando comparados à testemunha. O mesmo observa-se para a espessura da parede que contraiu com o aumento da temperatura, observando-se reduções significativas já nos cavacos tratados a 180°C, onde a contração foi de 12,64% em relação à testemunha. Nos tratamentos a 220 e 260°C, esta retração foi ainda maior, diminuindo a espessura da parede, respectivamente, em 31,98 e 44,63%, comparado à testemunha. Pereira et al. (2016b) também observaram redução da espessura de parede das fibras quando submetidas à ação do calor.

Segundo Silva et al. (2016a), a parede celular da planta é uma estrutura complexa composta de ligninas, celulose, hemiceluloses, dentre outros. Sabe-se que a torrefação degrada os constituintes químicos da madeira, principalmente as hemiceluloses e celulose, o que explica a redução da parede celular como resultado do aumento da temperatura de torrefação. Além disso, quando a celulose sofre o processo de secagem, as cadeias da região amorfa se aproximam umas das outras e formam fortes ligações, diminuindo a espessura da parede celular.

O diâmetro do lume foi ampliado em relação à testemunha em 38,06 e 41,45% nas fibras dos cavacos tratados, respectivamente, a 220 e 260°C. Estes fatos estão associados, principalmente, com a diminuição da largura e da espessura da parede das fibras.

Segundo Silva et al. (2007), quanto maior for o diâmetro do lume, mais espaços vazios são encontrados na madeira, logo, menor é a massa específica do material. Nesse sentido, espera-se que a testemunha tenha maior massa específica que os cavacos torreficados.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de rendimento gravimétrico e da composição química estrutural da madeira *in natura* e torreficada.

Tabela 2 – Valores médios de rendimento gravimétrico, holoceluloses, lignina total e extrativos da madeira *in natura* e torrificada

Análise	Temperatura de torrefação			
	<i>In natura</i>	180°C	220°C	260°C
RG (%)	-	97,73 a	86,89 b	71,72 c
Holocelulose (%)	69,21 a	70,17 a	60,48 b	45,64 c
Lignina Total (%)	26,87 b	25,37 b	32,26 b	47,54 a
Extrativos totais (%)	3,63 d	4,24 c	7,00 a	6,47 b

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem significativamente entre si (Tukey $p > 0,05$)

Observa-se a diminuição significativa do rendimento gravimétrico com o aumento da temperatura. O mesmo foi observado por Pereira et al. (2016a) e Matali et al. (2016), que nas temperaturas de 300°C encontraram reduções, respectivamente, de até 40 e 50% para madeira de eucalipto e de palmeira. Embora a redução do rendimento gravimétrico não seja tão desejável em um material destinado à geração de energia, os resultados encontrados neste trabalho estão dentro do esperado para uma torrefação típica, conforme descrito por Vidal e Hora (2011).

A diminuição do rendimento gravimétrico está relacionada com a perda de massa dos constituintes da madeira quando submetidos à ação do calor, principalmente da holocelulose (celulose e hemiceluloses) que neste estudo apresentaram redução de até 34,06% na torrefação à 260°C.

Araújo et al. (2012) esclarecem que as hemiceluloses são menos estáveis termicamente e degradam mais rapidamente em comparação com os outros constituintes primários (celulose e lignina). Esta teoria é ratificada por Yang et al. (2007) que explicam que as hemiceluloses apresentam degradação de massa concentrada na faixa de 220 a 315°C, enquanto a degradação da celulose concentra-se na faixa de 315 a 400°C. Essas ocorrências justificam as diferenças significativas nos tratamentos acima de 220°C.

Nota-se que o teor de lignina total aumentou com o incremento da temperatura de torrefação, resultando no acréscimo de 76,9% no material tratado à 260°C quando comparado à testemunha. O aumento proporcional do teor de lignina no material se dá basicamente por dois motivos. O primeiro está associado à elevada proporção de degradação das holoceluloses. O segundo é resultado da maior estabilidade térmica da

lignina, que, apesar de possuir a degradação térmica iniciada em 160°C e finalizada em temperaturas próximas a 900°C, ela degrada-se mais lentamente (YANG et al., 2007).

A lignina, por ser um elemento químico complexo e mais estável termicamente, é um importante parâmetro de qualidade do material, pois normalmente, quanto maiores forem os teores de lignina maior será o poder calorífico superior do material e maior o rendimento gravimétrico do produto (PROTÁSIO et al., 2012).

De modo geral, o teor de extrativos totais aumentou com o aumento da temperatura de torrefação, tendo seu pico máximo na torrefação de 220°C. Este aumento do teor de extrativos está relacionado à diminuição dos teores de holoceluloses e, mais especificamente, à degradação das hemiceluloses, que, segundo Zanuncio et al. (2014), podem formar produtos, resultando em maior teor de extrativos totais contabilizados no material. A diminuição do teor de extrativos observada a 260°C é explicada pela volatilização dos mesmos quando submetidos a altas temperaturas.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios percentuais da composição química elementar e imediata da madeira *in natura* e torrificada.

Tabela 3 – Valores médios da composição química elementar e imediata da madeira *in natura* e torrificada

Propriedades (%)	Temperatura de torrefação			
	<i>In natura</i>	180°C	220°C	260°C
Carbono	48,76 c	48,99 c	50,86 b	54,76 a
Oxigênio	44,46 a	44,23 a	42,74 b	39,25 c
Hidrogênio	6,18 a	6,29 a	5,90 b	5,57 c
Nitrogênio	0,07 a	0,02 b	0,02 b	0,03 b
Enxofre	0,24 a	0,25 a	0,21 a	0,05 b
Cinzas	0,29 b	0,22 b	0,28 b	0,35 a
Materiais voláteis	86,60 a	87,31 a	82,09 b	75,14 c
Carbono fixo	13,12 c	12,47 c	17,63 b	24,51 a

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem significativamente entre si (Tukey $p > 0,05$)

Observa-se que a torrefação modificou a composição química elementar da madeira. Nota-se que o aumento da temperatura de torrefação teve relação positiva com os teores de carbono e relação inversa com os teores de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio

e enxofre. A mesma relação foi relatada por Silva et al. (2016b) e Bach et al. (2014).

Segundo Silva et al. (2016b), a redução dos teores de hidrogênio e oxigênio durante a torrefação acontece principalmente pela degradação térmica dos grupos hidroxilas presentes nos polissacarídeos, sendo eliminados como CO₂, CO e H₂O.

Neste trabalho, observou-se uma relação C/O de 1,09 para a testemunha, e de 1,11, 1,19 e 1,40 para os cavacos tratados, respectivamente, a 180, 220 e 260°C, ou seja, um incremento de 28,44% no tratamento a 260°C quando comparado à testemunha. Este incremento é importante para a geração de energia, pois, segundo Pereira et al. (2016a), quanto menor o teor de oxigênio e maiores os teores de carbono e hidrogênio, maior o poder calorífico do material.

Observa-se também uma relação C/H de 7,9 para a testemunha, enquanto para os cavacos tratados a 180, 220 e 260°C, essa relação foi de, respectivamente, 7,8, 8,6 e 9,83, originando um incremento de 24,74% no tratamento a 260°C em comparação aos cavacos *in natura*. Este incremento na relação C/H está associado ao baixo teor de hidrogênio nas torrefações em temperaturas mais elevadas, fato indesejável, pois segundo Protásio et al. (2011) o acréscimo em 1% no teor de hidrogênio pode ocasionar um aumento de aproximadamente 514,75 kcal.kg⁻¹ no poder calorífico superior da biomassa, enquanto o acréscimo em 1% de teor de carbono acarreta um aumento de apenas 64,14 kcal.kg⁻¹ no valor calórico da mesma.

Para Soares et al. (2014), o aumento da relação C/H está associada a aumentos do teor de compostos aromáticos, logo, acredita-se que a torrefação ocasione o acúmulo destes compostos no material, visto que esta relação aumentou com o tratamento térmico. Ainda segundo os autores, este incremento na relação C/H origina elevação do teor de carbono fixo do material, o que corrobora com o valor encontrado neste trabalho.

A diminuição dos teores de nitrogênio e enxofre são desejáveis. Segundo Reis et al. (2012), altas relações C/N implicam em uma quantidade menor de nitrogênio a ser liberada para o ambiente após a combustão da biomassa. Em contrapartida, quanto menor for a relação C/N, mais rápida será a liberação de CO₂ para a atmosfera durante a combustão, um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa (CAMPOS, 2008). Neste trabalho, observou-se incremento na relação C/N, um efeito positivo ocasionado pela torrefação.

Os teores de materiais voláteis reduziram com o aumento da temperatura de torrefação, em contrapartida os de carbono fixo e de cinzas aumentaram, corroborando com o encontrado por Protásio et al. (2015).

Segundo Macedo et al. (2014), o teor de materiais voláteis tem elevada correlação positiva com o teor de holoceluloses do material, o que explica a diminuição do teor de voláteis em 5,2 e 13,2% nas temperaturas de 220 e 260°C, respectivamente. O teor de materiais voláteis é um importante parâmetro na queima direta do material, pois segundo Moon et al. (2013), quanto maior a quantidade e emissão de materiais voláteis, menor a temperatura de ignição da biomassa. Nesse sentido, acredita-se que os cavacos torreficados a 260°C tenham maior temperatura de ignição que os demais, carecendo de mais energia para iniciarem a combustão.

De acordo com Protásio et al. (2015), os combustíveis com maior teor de carbono fixo apresentam temperatura de ignição superior, tendem a queimar mais lentamente e apresentam maior estabilidade térmica, portanto, é plausível que os cavacos torreficados nas temperaturas de 220 e 260°C sejam mais eficientes na combustão, tendo uma queima mais homogênea e contínua, visto que a torrefação nestas temperaturas ocasionou, respectivamente, um incremento de 34,4 e 86,8% de carbono fixo no material.

O aumento em 20,7% do teor de cinzas nos cavacos torreficados a 260°C é resultado da perda de massa orgânica da biomassa, principalmente pela degradação das hemiceluloses, diminuindo o percentual de materiais voláteis. O teor de cinzas é uma característica intrínseca da biomassa inicial e observa-se que diferentes espécies e clones apresentam diferentes teores (TRUGILHO et al., 2014). Para a geração de calor são desejáveis baixos teores de cinzas, pois elas acarretam a diminuição do potencial energético e aumentam a corrosão dos equipamentos designados à combustão da biomassa (TAN e LAGERKVIST, 2011; BUSTAMANTE-GARCÍA et al., 2013).

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios da densidade a granel, umidade de equilíbrio higroscópico, poder calorífico superior e útil e densidade energética dos cavacos de madeira *in natura* e torreficados.

Tabela 4 – Valores médios da umidade de equilíbrio higroscópico (UEH), densidade a granel (DG), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (DEN) dos cavacos de madeira *in natura* e torreficados

Propriedade	Temperatura de torrefação			
	<i>In natura</i>	180°C	220°C	260°C
UEH (%)	12,49 a	9,11 b	5,50 c	5,08 c
DG (kg.m ⁻³)	224 a	226 a	212 b	203 c
PCS (kcal.kg ⁻¹)	4604 c	4648 c	4799 b	5128 a
PCU (kcal.kg ⁻¹)	3968 b	4086 b	4481 a	4677 a
DEN (MJ.m ⁻³)	3717 c	3873 b	3989 a	3984 a

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem significativamente entre si (Tukey $p > 0,05$)

Em temperaturas mais elevadas houve redução da densidade a granel com o aumento da temperatura, tendo o tratamento de 260°C um decréscimo de 9,38% em massa para um mesmo volume, em relação à testemunha. Este fato é explicado pela maior degradação dos constituintes da madeira associada à baixa contração volumétrica. O mesmo foi observado por Protásio et al. (2015), que associou a redução da densidade a granel com a degradação, principalmente, das hemiceluloses corroborando com o encontrado neste trabalho.

Pereira et al. (2016a) explica que a densidade a granel é um importante parâmetro a ser avaliado, pois interfere no espaço ocupado pela biomassa, sendo que quanto maior a densidade a granel, menor o espaço necessário para transportar, armazenar ou incinerar o material. Sendo assim, a densidade a granel pode ser decisiva na viabilidade econômica de uso do material.

Observa-se que a umidade de equilíbrio higroscópico tende a diminuir com o aumento da temperatura de torrefação, observando-se uma redução significativa no tratamento de 180°C. Os tratamentos que mais ocasionaram redução nos valores de UEH foram os de 220 e 260°C, diminuindo a umidade de equilíbrio higroscópico em 55,96 e 59,33%, respectivamente, quando comparadas à testemunha.

Sabe-se que a madeira é um material higroscópico, portanto, absorve ou perde água de acordo com a umidade do ambiente em que se encontra. Observa-se uma redução da umidade de equilíbrio higroscópico com o aumento da temperatura de torrefação. Isso significa que, em um mesmo ambiente, os cavacos tratados terão umidade de equilíbrio

inferior aos cavacos *in natura*, podendo a torrefação reduzir 59% esta propriedade, como observado para o tratamento a 260°C. Essa redução é desejável, visto que, quanto menor o teor de umidade, menos energia é gasta para evaporar a água contida nos cavacos, portanto, maior o potencial energético do material.

A redução da umidade de equilíbrio higroscópico está associada, principalmente, à degradação das hemiceluloses e do acúmulo de lignina no material. Dias e Simonelli (2013) explicam que as hemiceluloses, em geral, são muito hidrofílicas devido a sua estrutura ramificada e amorfa, favorecendo a absorção de água. Sendo assim, quanto menor o percentual de hemiceluloses, menor a umidade do material. Além disso, a degradação das hemiceluloses favorece a concentração de lignina, que segundo Westphal e Meireles (2016) são, em geral, mais hidrofóbicas.

Nota-se que o aumento da temperatura de torrefação tem relação positiva com o aumento do poder calorífico superior dos cavacos, apresentando variações significativas nas torrefações a 220 e 260°C, onde resultou, respectivamente, acréscimos de 4,2 e 11,4% em relação à testemunha. Este fato também está associado à degradação das hemiceluloses e do acúmulo, proporcional, da lignina no material, pois, segundo Vital et al. (2013), o poder calorífico da lignina (21 a 27 MJ kg⁻¹) é superior ao da celulose (17,2 a 17,5 MJ kg⁻¹) e das hemiceluloses (16,0 MJ kg⁻¹). Outro fato que explica o aumento em PCS é o aumento na concentração de carbono fixo nos tratamentos de 220 e 260°C.

O PCS é um parâmetro que expressa a quantidade de energia liberada na queima de uma determinada massa de material, portanto, quanto maior este índice, maior o potencial de uso da biomassa para geração de energia. Quanto ao poder calorífico útil, nota-se um aumento com o incremento da temperatura de torrefação. Este fato está associado principalmente com o aumento do PCS e com a redução da umidade de equilíbrio higroscópico e do teor de hidrogênio do material.

Nota-se um aumento da densidade energética em função do aumento da temperatura de torrefação, tendo os cavacos torreficados a 180, 220 e 260°C uma densidade energética, respectivamente, 4,19, 7,31 e 7,18% superior à testemunha. Pereira et al. (2016a) explica que a densidade energética é um importante parâmetro a ser determinado, visto que influencia no transporte do material, na quantidade de biomassa consumida no processo de queima e no tamanho do silo de armazenamento de biomassa de uma máquina, quando se associa a quantidade de energia necessária e as características do material.

Pelo fato da torrefação a 220 e 260°C terem sido estatisticamente iguais na densidade energética e terem apresentado ganhos em comparação à testemunha e aos

cavacos tratados a 180°C, ambas as temperaturas podem ser indicadas para a torrefação. Entretanto, salienta-se que materiais com maiores teores de lignina tendem a apresentar maior estabilidade térmica, permanecendo nos queimadores por períodos mais longos e gerando uma queima mais homogênea, assim, recomenda-se a torrefação na temperatura a 260°C.

4. CONCLUSÕES

- A torrefação melhorou as propriedades energéticas dos cavacos de madeira de *Eucalyptus urophylla*.
- Em maiores temperaturas de torrefação, diminuiu-se a espessura de parede e largura das fibras, em contrapartida, aumentou-se o diâmetro do lume.
- O aumento da temperatura de torrefação teve correlação positiva com o aumento de lignina total, carbono elementar e carbono fixo, tendo como consequência o aumento do poder calorífico superior e útil, menor rendimento gravimétrico e menor umidade de equilíbrio higroscópico.
- A torrefação a 260°C apresentou vantagens frente aos outros tratamentos, como maior densidade energética, poder calorífico superior e útil, além de maior acúmulo de lignina e carbono fixo, sendo a mais recomendada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials.** Philadelphia, 1982.

ARAÚJO, S. D. O.; VITAL, B. R.; MENDOZA, Z. M. D. S. H. D.; VIEIRA, T. A.; CARNEIRO, A. D. C. O. Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* e SP. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 327-336, set. 2012.

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

BACH, Q.-V.; TRAN, K.-Q.; SKREIBERG, O.; KHALIL, R. A.; PHAN, A. N. Effects of wet torrefaction on reactivity and kinetics of wood under air combustion conditions. **Fuel**, v. 137, p. 375-383, 2014. doi: 10.1016/j.fuel.2014.08.011

BATIDZIRAI, B.; MIGNOT, A. P. R.; SCHAKEL, W. B.; JUNGINGER, H. M.; FAAIJ, A. P. C. Biomass torrefaction technology: techno-economic status and future prospects. **Energy**, v. 62, p. 196–214, 2013.

BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; BREHMER, D. R.; KÜSTER, L. C. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, v. 41, p. 401-410, 2013.

BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; CARRILLO-PARRA, A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, H.; RAMÍREZ-LOZANO, R. G.; CORRAL-RIVAS, J. J.; GARZA-OCAÑAS, F. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl. **In a Brazilian beehive kiln.** Industrial Crops and Products, Washington, US, v. 42, p. 169–174, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.04.034.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela**

espectroscopia NIR. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2008.

CHEN, W. H.; LU, K. M.; LEE, W. J.; LIU, S. H.; LIN, T. C. Non-oxidative and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass. *Appl. Energy*, v. 114, p. 104–113, 2014.

CUNHA, A. B. D.; BRAND, M. A.; SIMÃO, R. L.; MARTINS, S. A.; ANJOS, R. A. M. D.; SURDI, P. G.; SCHIMALSKI, M. B. Determination of yield of raw material of *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage by different sawing methods. *Revista Árvore*, v. 39, n. 4, p. 733-741, 2015.

DADSWELL, H. E. The anatomy of eucalypt wood. Melbourne: **Forest Products Laboratory**, CSIRO, n. 66, p. 1-28, 1972.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – **EN 14918: Determination of calorific value**. Belim: CEN: 63 p. 2010a.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – **DIN EN 15103: Solid biofuels – Determination of bulk density**. Alemanha, 2010b.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – **DIN EN 15104: Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods**. Berlim: CEN: 15 p. 2011a.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – **DIN EN 15296: Conversion of analytical results from one basis to another**. Berlim: CEN: 15 p. 2011b.

DIAS, O.A.; SIMONELLI, G. Qualidade da madeira para a produção de celulose e papel. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 9, n. 17; p. 3632-3646, 2013.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Eds) **Lignins**. New York: Wiley Interscience, 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.

MACEDO, L. A.; ROUSSET, P. L. A.; VALE, A. T. Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis da torrefação de resíduos vegetais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.34, n.80, p.417-424, 2014.

MAGALHÃES, M. A. **Tratamento térmico de partículas e pellets de madeira em reator tipo rosca sem fim**. 2016. 55f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

MATALI, S.; RAHMAN, N. A.; IDRIS, S. S.; YAACOB, N.; ALIAS, A. B. Lignocellulosic biomass solid fuel properties enhancement via torrefaction. **Procedia Engineering**, v. 148, p. 671-678, 2016.

MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G.; KIM, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Amsterdam, v. 47, p. 232–240, 2013. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.01.019

NA, B.; KIM, Y.-H.; LIM, W.-S.; LEE, S.-M.; LEE, H.-W.; LEE, J.-W. Torrefaction of oil palm mesocarp fiber and their effect on pelletizing. **Biomass Bioenergy**, v. 52, p. 159–165, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.041>

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, v. 45, p. 57-64, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v45i1.30157>

PEREIRA, M. P. C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; OLIVEIRA, A. C. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 36, n. 87, p. 269-275, 2016a.

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.;

CARNEIRO, A. D. C. O.; MAGALHÃES, M. A. D. Effect of wood carbonization in the anatomical structure and density of charcoal from *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016b.

PREVEDELLO, J.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; VOGELMANN, E. S.; FONTANELA, E.; REICHERT, J.M. Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em Argissolo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 129-138, 2013.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; SIQUEIRA, H. F.; MELO, I. C. N. A.; ANDRADE, C. R.; JUNIOR, J. B. G. Caracterização energética de pellets *in natura* e torreficados produzidos com madeira residual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 435-442, 2015.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

SHANG, L.; AHRENFELDT, J.; HOLM, J. K.; BACH, L. S.; STELTE, W.; HENRIKSEN, U. B. Kinetic model for torrefaction of wood chips in a pilot-scale continuous reactor. In: **Journal of analytical and applied pyrolysis**. v. 108, p. 109-116, 2014.

SILVA, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J. T. S.; CASTRO, V. R. Influência de idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira

de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1081-1090, 2007. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622007000600013>

SILVA, V. L.; BORGES, I.; ARAÚJO, A. R.; COSTA, H. H. A.; ALVES FILHO, F. M.; FRUTUOSO, F. I. A.; SILVA, R. H. P.; ANCÂNTARA, P. B. X. Efeito do tratamento químico sobre a digestibilidade de volumosos e subprodutos agroindustriais. **Acta Kariri Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 1, n. 1, p. 29-37, 2016a.

SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; ALVES, I. C. N.; MAGALHÃES, M. A. Stability to thermal degradation and chemical composition of woody biomass subjected to the torrefaction process. **European Journal of Wood and Wood Products**, 2016b. doi:10.1007/s00107-016-1060-z

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>.

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

STRANDBERG, M.; OLOFSSON, I.; POMMER, L.; WIKLUND-LINDSTRÖM, S.; ÅBERG, K.; NORDIN, A. Effects of temperature and residence time on continuous torrefaction of spruce wood. **Fuel Processing Technology**, v. 134, n. 4467, p. 387-398, 2015.

TAN, Z.; LAGERKVIST, A. Phosphorous recovery from the biomass ash: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 15, n. 8, p. 3588-3602, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.05.016

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

TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, C. O.; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C.

N.; PROTÁSIO, T. P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 661-666, 2014.

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, p. 3748-3762, 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.06.023

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 33, p. 261-314, 2011.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Ed.) **Bioenergia & Biorrefinaria: cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa, MG. 2013. p. 321–354.

WESTPHAL, S.; MEIRELES, C.S. Caracterização de membranas de poliuretano (PU) com lignina extraída a partir da fibra da casca do coco. **Brazilian Journal of Production Engineering**, São Mateus, Suplemento Especial 4 Workshop de Engenharia Química, v. 2, n. 2, p. 77-83, 2016.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D.H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12, p. 1781-1788, 2007. DOI: 10.1016/j.fuel. 2006.12.013.

ZANUNCIO, A. J. V.; NOBRE, J. R. C.; MOTTA, J. P.; TRUGILHO, P. F. Química e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden termorretificada. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 765-770, ago. 2014. DOI: 10.1590/S0100-67622014000400020

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, E. M. G. C. S.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. Propriedades energéticas da madeira e carvão de *Corymbia* e *Eucalyptus* em diferentes condições de secagem. **Agrária**, v. 10, n. 3, p. 432-436, mai. 2015. DOI: 10.5039/agraria.v10i3a3601.

CAPÍTULO II

COMBUSTÃO ESPONTÂNEA DE MADEIRA TRATADA TERMICAMENTE

RESUMO – A combustão espontânea é um fenômeno químico em que o material aquece lentamente, através de reações exotérmicas internas, até atingir temperaturas mais elevadas que o ambiente. Apesar de alguns estudos evidenciarem que o carvão vegetal não é passível deste fenômeno, a Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT o classifica como substância sujeita a combustão espontânea. Assim, alguns órgãos de fiscalização e controle de alguns estados brasileiros exigem que o transporte viário do carvão vegetal siga as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 7500 (2004), ou que o transportador viário do carvão vegetal possua uma declaração de que o produto foi ensaiado e considerado não-perigoso para o transporte, gerando um custo extra e enfraquecendo o setor carvoeiro. Neste sentido, existe a preocupação também de que possa vir a exigir este controle dos cavacos torreficados, uma biomassa ainda em expansão no mercado brasileiro. Assim sendo, este trabalho teve como objetivo verificar se cavacos de madeira de *Eucalyptus urophylla* tratados termicamente são passíveis de combustão espontânea, associando esta informação com as análises termogravimétricas (TGA/DTG) e de calorimetria diferencial exploratória (DSC) dos materiais. Para realização do estudo, cavacos de madeira *in natura*, torreficados por 20 min em um reator tipo rosca sem fim nas temperaturas de 180, 220 e 260°C e carvão vegetal produzido em forno de alvenaria foram submetidos às análises termogravimétricas, de calorimetria diferencial exploratória e ao teste de combustão espontânea recomendado pela Organização das Nações Unidas (2009). Verificou-se que nenhuma das biomassas estão enquadrados na classe de risco 4.2 da Resolução da ANTT (2004), portanto, a regulamentação da NBR 7500 (2004) não necessita ser aplicada. Além disto, constatou-se que os tratamentos térmicos aumentaram a estabilidade térmica das biomassas, tendo o carvão vegetal obtido uma massa residual quase cinco vezes superior à testemunha na análise termogravimétrica limitada a 450°C.

Palavras-chave: combustão espontânea, carvão vegetal, torrefação

SPONTANEOUS COMBUSTION OF WOOD THERMALLY TREATED

ABSTRACT – Spontaneous combustion is a chemical phenomenon in which the material heats slowly, through internal exothermic reactions, until it reaches temperatures higher than the environment. Although some studies show that charcoal is not susceptible to this phenomenon, the National Land Transport Agency (ANTT) classifies it as a substance subject to spontaneous combustion. Thus, some inspection and control agencies in some Brazilian states require that charcoal road transport follow the standards of the Brazilian Association of Technical Standards - ABNT NBR 7500 (2004), or that the charcoal conveyor has a statement that the product has been tested and considered non-hazardous for transportation, generating an extra cost and weakening the coal industry. In this sense, there is also concern that it may require this control of the torrefied chips, a biomass still expanding in the Brazilian market. Therefore, the objective of this work was to verify if thermally treated *Eucalyptus urophylla* wood chips are capable of spontaneous combustion, associating this information with thermogravimetric (TGA / DTG) and differential scanning calorimetry

(DSC) analysis of materials. For the study, fresh wood chips, torrefied for 20 min in an endless screw-type reactor at temperatures of 180, 220 and 260°C and charcoal produced in a masonry furnace were subjected to thermogravimetric analysis, differential exploratory calorimetry and spontaneous combustion test recommended by the United Nations (2009). It was verified that none of the biomasses are classified in risk class 4.2 of the Resolution of ANTT (2004), therefore, the regulation of NBR 7500 (2004) does not need to be applied. In addition, it was found that the thermal treatments increased the thermal stability of biomasses, and the charcoal obtained a residual mass almost five times greater than the control in thermogravimetric analysis limited to 450°C.

Keywords: spontaneous combustion, charcoal, torrefaction

1. INTRODUÇÃO

Segundo Domingos et al. (2012), combustível é qualquer substância que reage quimicamente com o oxigênio e libera energia, ou seja, possui propriedade exotérmica. Os combustíveis podem ter origem não-renovável como o petróleo, carvão mineral, gás natural e xisto; ou renovável, como o caso do bagaço de cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal.

Todo combustível possui um risco de inflamabilidade, que segundo Siqueira (2012) é definida como a facilidade com que um material queima ou entra em ignição, causando incêndio ou combustão. Em alguns casos, esta combustão pode ocorrer espontaneamente, sem fornecimento externo de energia.

A combustão espontânea é um acontecimento químico que ocorre a partir da reação de materiais combustíveis com o oxigênio, ocasionando uma lenta geração de calor, pelo qual os materiais elevam suas temperaturas, através de reações exotérmicas internas, e atingem temperaturas maiores do que o ambiente (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT, 2004; QUINTIERE et al. 2012). Em outras palavras, a combustão espontânea ocorre quando a taxa de produção de calor excede a taxa de perda, atingindo a temperatura de autoignição (Resolução da ANTT nº 420/04, 2004).

Com a combustão espontânea o material é queimado indesejadamente, ocasionando perda de massa e/ou incêndios que podem alastrar-se. Além disto, ocorre a emissão de partículas finas para a atmosfera, podendo provocar problemas de saúde e outras reações adversas na população (RECH, 2002).

No Brasil, dentre as diferentes biomassas utilizadas para energia, somente o carvão

vegetal é considerado como um produto passível de combustão espontânea, sendo enquadrado na classe de risco 4.2 da Resolução da ANTT (2004). Assim sendo, a ANTT determina que o transporte viário do carvão vegetal seja realizado em transportadores devidamente identificados e sinalizados, conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 7500 (2004). Entretanto, caso o transportador possua uma declaração informando que o produto foi submetido a testes físico-químicos que comprovem que o mesmo não apresenta o perigo de autoignição no transporte, a regulamentação que rege o transporte terrestre de produtos perigosos não necessita ser aplicada.

Apesar de a ANTT classificar o carvão vegetal na classe de substâncias sujeitas a combustão espontânea, pesquisadores científicos têm questionado esta decisão, afirmando que este produto não é passível deste fenômeno. Rohde (2007) afirma que o único fundamento para classificar o carvão vegetal como substância sujeita a combustão espontânea é a temperatura em que o material entra em ignição e a interação do produto com a temperatura ambiente. Para a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a temperatura de ignição do carvão vegetal está entre 315,8 a 399,2°C, ou seja, em temperaturas muito acima da temperatura ambiente.

Assim, salienta-se que grande parte dos incêndios causados em caminhões que transportam carvão vegetal está relacionada com o mau manuseio do material, que é colocado ainda quente no caminhão, e não com a capacidade de combustão espontânea desta biomassa.

Em 2009, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou o Manual de Ensaios e Critérios de Recomendação sobre o Transporte de Mercadorias Perigosas, contendo um teste que permite verificar se combustíveis sólidos, como o carvão vegetal, *pellets* e cavacos de madeira, são passíveis de combustão espontânea.

A exigência deste teste ou do transporte especial para o carvão vegetal implica em um custo extra para os produtores de carvão e é vista como empecilho para realização do transporte e exportação do produto, prejudicando e enfraquecendo o setor. Neste sentido, existe a preocupação de que as autoridades possam vir a exigir este teste para o transporte dos cavacos de madeira torreficados, o que enfraqueceria o consumo desta biomassa ainda em expansão no Brasil.

Assim sendo, este trabalho tem como objetivo verificar se cavacos de madeira *in natura*, torreficados e carbonizados são classificados como substâncias sujeitas à combustão espontânea, associando esta informação com as análises termogravimétricas (TGDA/DTG) e de calorimetria diferencial exploratória (DSC) dos materiais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado com cavacos de madeira de *Eucalyptus urophylla*, de aproximadamente 7 anos de idade, provenientes de plantios experimentais da Universidade Federal de Viçosa. Os cavacos de madeira foram peneirados, sendo utilizados no experimento aqueles que ficaram retidos na peneira de 16 mm e passaram na peneira de 31,5 mm. Após a classificação, os cavacos foram secos em estufa a $103\pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem 0% de umidade em base seca. Posteriormente, os cavacos foram torreficados por 20 minutos nas temperaturas de 180, 220 e 260°C . Para a torrefação utilizou-se um reator tipo rosca sem fim desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, conforme descrito por Magalhães (2016). As amostras de carvão vegetal foram obtidas por carbonizações em forno de alvenaria, com temperatura final de 450°C , e duração equivalente a três dias de carbonização e três dias de resfriamento.

A composição química imediata do material torreficado e *in natura* foi determinado de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), com algumas adaptações, para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

Para a determinação da Umidade de Equilíbrio Higroscópico (UEH) as amostras foram climatizadas a 20°C e 65 % de umidade relativa até atingir massa constante. A umidade foi calculada em base seca.

Para análise termogravimétrica (TGA/DTG) dos materiais, utilizou-se o aparelho DTG-60H, Shimadzu. As análises foram realizadas sob atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de $50\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ até temperatura máxima de 500°C , com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. A curva termogravimétrica (TG) foi obtida para avaliar a perda de massa em função da temperatura e da curva da derivada primeira da perda de massa (DTG), visto que as curvas termogravimétricas (TG) representam a perda de massa, em porcentagem, em função da temperatura, enquanto as curvas DTG correspondem à derivada primeira das curvas TG e apresentam a variação da massa em relação ao tempo, registradas em função da temperatura.

Para a calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi utilizado o equipamento DSC-60A, Shimadzu. As curvas DSC foram obtidas em atmosfera de nitrogênio com vazão constante de $50\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, utilizando-se uma cápsula de alumínio prensada. Foram usados aproximadamente 2 mg de serragem. A temperatura inicial foi de 50°C e a temperatura máxima de 450°C , com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.

Para o teste de combustão espontânea foi utilizada a norma para classificação de

substâncias sujeitas a combustão espontânea do Manual de Ensaios e Critérios de Recomendação Sobre o Transporte de Mercadorias Perigosas (UNITED NATIONS - ONU, 2009). Os materiais *in natura*, torrificados e carbonizados, foram testados na umidade de equilíbrio higroscópico. Para desenvolvimento deste teste, um recipiente de aço inox com malha de 0,595 mm e tamanho de 150x150x250 mm foi colocado no centro de uma estufa de circulação de ar forçado. Dentro deste recipiente, foram realizados dois testes, um em frasco cúbico de 100 mm e outro em frasco cúbico de 25 mm, ambos cheios das amostras da madeira *in natura*, torrificada ou carbonizada, e envoltos por um recipiente de aço inox com malha de 0,6 mm. Estes materiais foram aquecidos a 140, 120 ou 100°C por 24 horas. Utilizou-se dois termopares tipo J para monitorar a temperatura da amostra e da estufa, a cada 30 minutos. As temperaturas foram monitoradas e de acordo com a norma o material foi classificado, ou seja, se é uma substância passível ou não de combustão espontânea, bem como o grupo de embalagem que deve ser utilizado para que o material seja transportado com segurança.

Na figura 1 está apresentado o esquema de análise e classificação de combustíveis sólidos quanto ao teste de combustão espontânea.

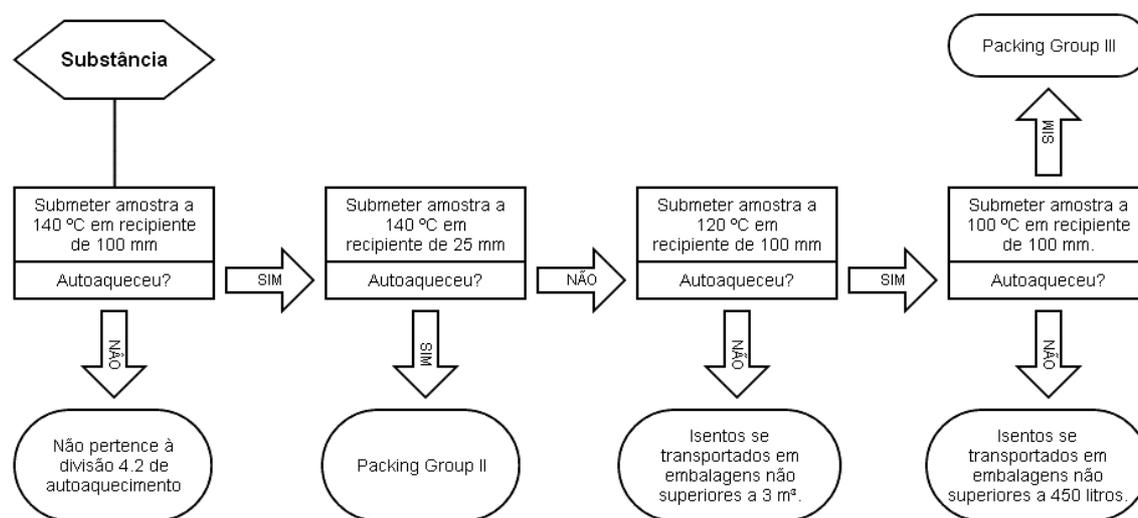


Figura 1. Esquema para análise de combustão espontânea e grupo de embalagem que deve ser utilizado no transporte do material (Adaptado da ONU, 2009)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados a composição química imediata e umidade de equilíbrio higroscópico dos materiais em função dos tratamentos.

Tabela 1 – Valores médios da composição química imediata e umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) da madeira *in natura* e torrificada

Propriedades (%)	<i>In natura</i> (madeira)	180°C	220°C	260°C	Carvão vegetal
UEH	12,49 a	9,11 b	5,50 c	5,08 c	5,07 c
Cinzas	0,29 c	0,22 c	0,28 c	0,35 b	0,71 a
Materiais voláteis	86,60 a	87,31 a	82,09 b	75,14 c	12,22 d
Carbono fixo	13,12 d	12,47 d	17,63 c	24,51 b	87,06 a

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem significativamente entre si (Tukey $p > 0,05$)

Na Tabela 2 são apresentadas as perdas de massa, em porcentagem, das biomassas submetidas aos tratamentos térmicos.

Tabela 2 – Perda de massa e massa residual dos materiais em função da temperatura

Tratamentos	Temperatura de degradação (°C)				Massa residual
	100-200	200-300	300-400	400-450	
<i>In natura</i> (madeira)	0,35	18,52	59,61	2,62	18,90
180°C	0,38	18,06	59,47	2,62	19,47
220°C	0,13	10,28	59,88	3,67	26,04
260°C	0,37	4,21	49,33	5,27	40,82
Carvão vegetal	0,91	1,50	2,35	1,55	93,69

Na faixa de temperatura entre 100 e 200°C, observa-se uma baixa degradação térmica dos materiais, com perda de massa variando entre 0,13 a 0,91%, sendo em média de aproximadamente 0,4%. Essa faixa de temperatura é denominada zona de estabilidade térmica da madeira, uma vez que a degradação térmica dos principais constituintes da madeira é limitada, observando apenas a liberação de água e de alguns compostos orgânicos voláteis nestas temperaturas (RANDRIAMANTENA et al., 2009; VAN DER STELT et al., 2011). Este fato, por si só, já evidencia que tanto a madeira quanto o carvão vegetal não são passíveis de combustão espontânea, visto que até temperaturas de 200°C, os mesmos possuem perda de massa mínima, ou seja, praticamente não há decomposição da biomassa para liberação de compostos inflamáveis.

Nota-se que os cavacos de madeira torrificadas e o carvão vegetal obtiveram maior

estabilidade térmica que a madeira *in natura*, comprovado pelas menores perda de massa ao longo do aquecimento e consequentemente, maior massa residual. Observa-se que quanto maior a temperatura de tratamento dos cavacos, maior foi a estabilidade térmica do material, corroborando com o relatado por Silva et al. (2016). Os cavacos tratados a 260°C obtiveram massa residual duas vezes maior que os cavacos *in natura*, enquanto para o carvão vegetal a massa residual foi quase cinco vezes maior que a testemunha. Estes resultados são explicados pela degradação das holoceluloses e acúmulo de lignina no material com o aumento da temperatura dos tratamentos térmicos. Salienta-se que a lignina apresenta maior estabilidade térmica que as holoceluloses.

Na Figura 2 são apresentadas as curvas termogravimétricas (TGA e DTG) dos cavacos submetidos aos tratamentos térmicos.

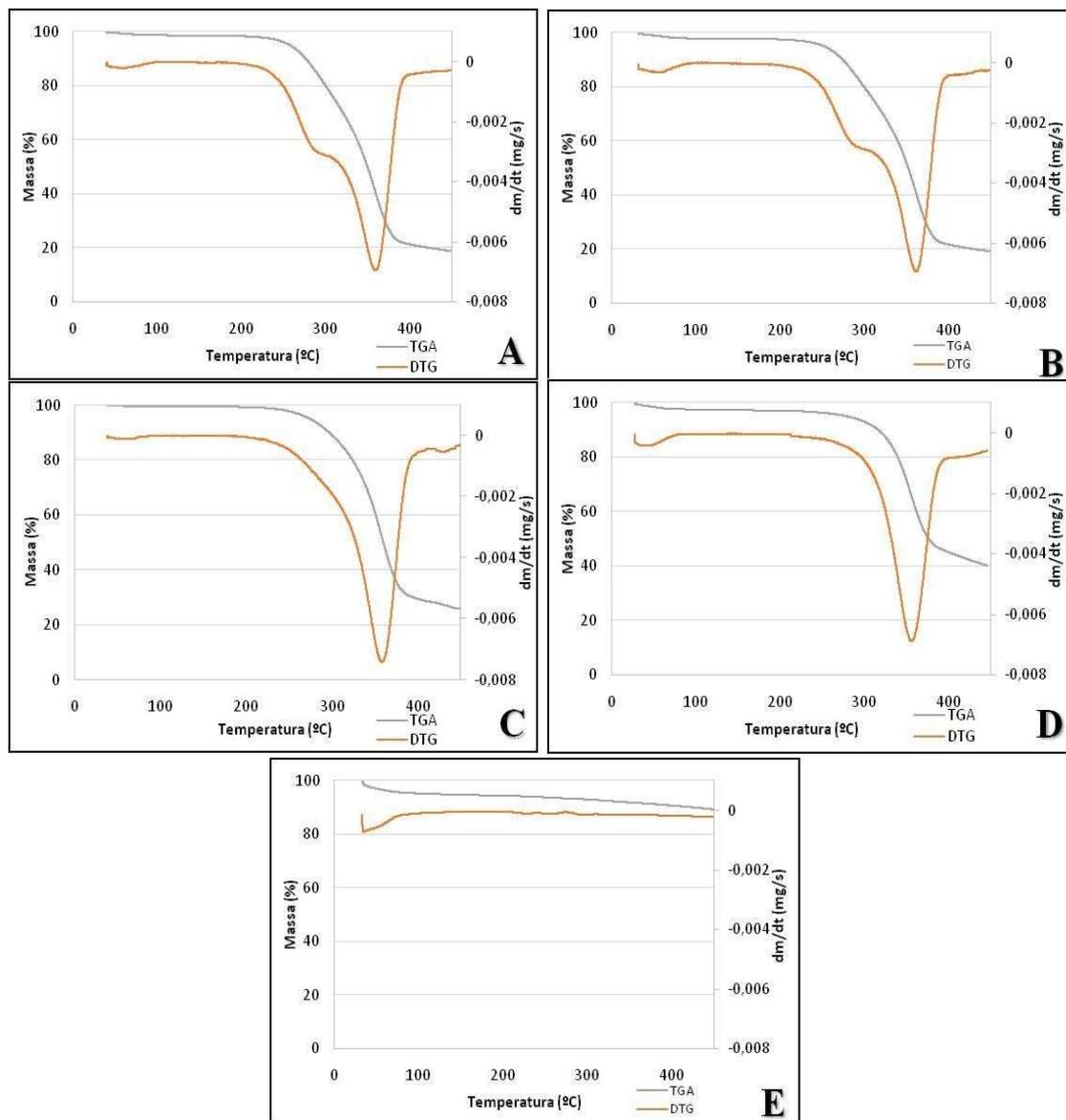


Figura 2 – Curvas termogravimétricas dos cavacos de madeira: A (*in natura*); B (180°C); C (220°C); D (260°C) e E (Carvão vegetal).

As curvas termogravimétricas representam a perda de massa, em porcentagem, em função da temperatura, enquanto as curvas DTG representam a variação da massa em relação ao tempo, registradas em função da temperatura.

Observa-se, na Figura 2, que os perfis de degradação térmica dos cavacos de madeira foram distintos para os diferentes tratamentos. Pereira et al. (2013) explica que as curvas TG/DTG indicam três faixas de degradação térmica, sendo a primeira, endotérmica, atribuída à secagem da madeira (0-100°C), a segunda atribuída à degradação de hemiceluloses e a terceira à degradação de celulose. Estes autores ressaltam que devido à decomposição da lignina ocorrer em ampla faixa de temperatura e possuir temperatura final de degradação superior a 450°C, ela não apresenta picos característicos nas análises de DTG e TGA, conforme pode ser observado na figura 2E.

Segundo Yang et al. (2007), a degradação térmica das hemiceluloses concentra-se na faixa de temperatura de 220-315°C. Assim, observa-se que a degradação das hemiceluloses iniciou-se nas temperaturas de 218 e 224°C, respectivamente, para a testemunha e os cavacos torreficados a 180°C, finalizando nas temperaturas de 308 e 309°C, respectivamente. Observa-se que para os tratamentos realizados nas temperaturas de 220, 260°C e no carvão vegetal não se verifica o pico característico das hemiceluloses, uma vez que nos processos de torrefação ou carbonização as hemiceluloses são degradadas. Nesta faixa de temperatura tiveram-se perdas de massa de 25,0, 23,8, 15,11, 6,5 e 1,5%, respectivamente, para os tratamentos *in natura*, 180, 220, 260 e carvão vegetal.

Yang et al. (2007) explicam que a celulose é degradada, principalmente, na faixa de temperatura compreendida entre 315 e 400°C. Verifica-se nas figuras 2A e 2B que a temperatura de degradação da celulose iniciou-se nas temperaturas de 311 e 314°C, respectivamente, para a testemunha e o tratamento de 180°C, e seu término ocorreu nas temperaturas de 391, 392, 398 e 396°C, respectivamente, para a testemunha e os tratamentos de 180, 220 e 260°C. Na faixa de temperatura de degradação da celulose (315-400°C), observaram-se perdas de massa de 51,7, 51,7, 54,4, 45,4 e 1,9% respectivamente, para os tratamentos *in natura*, 180, 220, 260°C e carvão vegetal, evidenciados na figura 2.

Na faixa de temperatura de 160 a 900 °C ocorre degradação da lignina (YANG et al., 2007). Salienta-se que, apesar da degradação da lignina ocorrer em ampla faixa de temperatura, a sua perda de massa é altamente inferior em comparação à celulose e hemiceluloses (RAAD et al., 2006; BURHENNE et al., 2013). Pelas curvas de TGA e

DTG, e pela tabela de degradação de massas, observa-se que os cavacos tratados termicamente a 260°C e o carvão vegetal apresentaram maior massa residual, sendo essa composta na sua maioria pela lignina, que apresenta alta estabilidade térmica.

Na figura 3 estão representadas as curvas DSC dos cavacos de madeira e do carvão vegetal em função dos tratamentos. Segundo Pereira et al. (2013), pela curva de DSC obtém-se a informação se a reação é caracterizada por liberação de calor (exotérmica) ou absorção de calor (endotérmica), além de fornecer a quantidade de calor envolvido na reação.

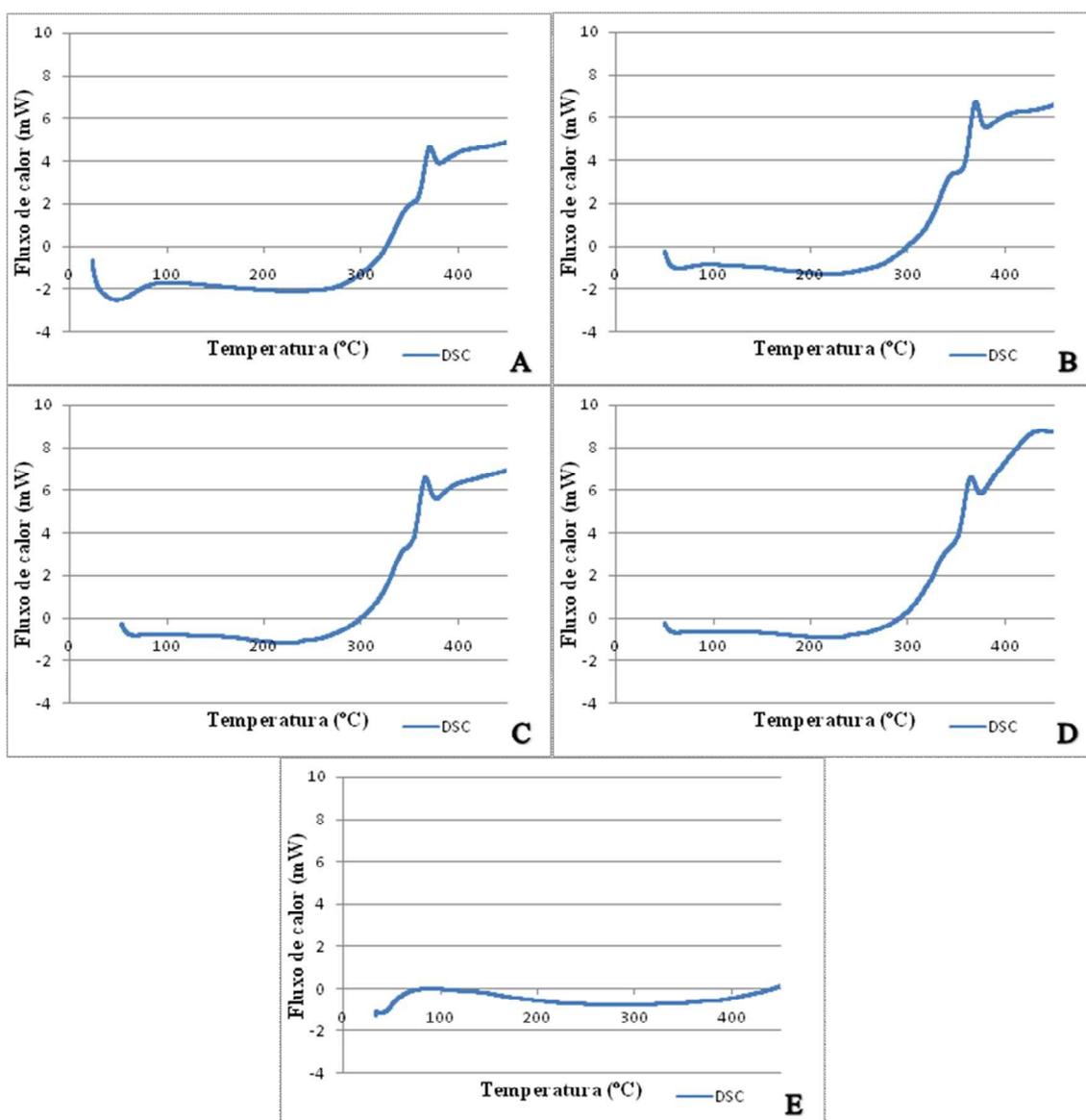


Figura 3 - Curvas da calorimetria diferencial exploratória (DSC) para dos cavacos de madeira: A (*in natura*); B (180°C); C (220°C); D (260°C) e E (Carvão vegetal).

Na tabela 3 estão as temperaturas relacionadas ao início do processo exotérmico e

aos picos máximos das curvas DSC dos cavacos de madeira e do carvão vegetal.

Tabela 3 – Temperatura de início do processo exotérmico e temperatura máxima dos picos exotérmicos das curvas DSC em função dos tratamentos

Tratamento	Início da fase exotérmica	1º Pico exotérmico	2º Pico exotérmico
<i>In natura</i> (madeira)	326°C	340°C	370°C
180°C	299°C	338°C	369°C
220°C	299°C	336°C	366°C
260°C	291°C	333°C	365°C
Carvão vegetal	443°C	N.O.	N.O.

N.O.: não observado

De modo geral, observaram-se dois picos para os cavacos tratados termicamente até 260°C, enquanto para o carvão vegetal não se observou pico definido até a temperatura avaliada (450°C) provavelmente devido à baixa concentração de holoceluloses ocasionada pelo tratamento térmico da madeira (torrefação/carbonização).

As curvas DSC indicaram um pico endotérmico entre as temperaturas de 50 e 100°C, que conforme elucidado por Alves (2014) pode representar a perda de água da madeira, pois se faz necessária a energia para a sua secagem. Nota-se que as curvas de DSC apresentaram comportamentos distintos, indicando que os materiais apresentam constituição química e elementar distintas.

Nota-se que a fase exotérmica dos cavacos iniciou em temperaturas acima de 291°C enquanto o do carvão vegetal foi superior a 443°C. Esta é uma importante informação, visto que comprova que tanto os cavacos tratados termicamente quanto o carvão vegetal não são passíveis de combustão espontânea, seja no seu transporte e/ou no seu armazenamento, uma vez que a temperatura ambiente terrestre não atinge estes valores.

Observa-se que os cavacos *in natura* tiveram o início da fase exotérmica em temperaturas superiores aos torrificados e inferiores ao carvão vegetal. Moon et al. (2013) explicam que a grande quantidade e emissão de materiais voláteis em uma biomassa aumentam a reatividade da partícula e, conseqüentemente, sua temperatura superficial, contribuindo para diminuir a temperatura de ignição do material. Entretanto, ressalta-se que quanto maior a umidade do material, maior o tempo e a temperatura necessária para que o mesmo entre em ignição.

O primeiro pico exotérmico, segundo Soares (2011) está associado à degradação da celulose e hemiceluloses. Nos cavacos de madeira, o primeiro pico exotérmico apresentou temperaturas máximas variando entre 333 e 340°C, inferiores às obtidas por Soares (2011) e semelhantes às encontradas por Alves (2014).

Posteriormente a esse primeiro pico, verifica-se uma pequena queda no fluxo de calor para os cavacos *in natura* e torreficados a 180 e 220°C. Pereira et al. (2013) relacionam esse comportamento com a degradação da celulose, que é inicialmente endotérmica devido ao gasto de energia nas reações de despolimerização.

O segundo pico exotérmico variou entre 365 e 370°C, temperaturas superiores ao do primeiro pico. Para Oliveira (2009) esse pico está relacionado com a formação de produtos que sofrem degradação secundária, advindos da decomposição da celulose.

A partir dos 400°C, observa-se que o fluxo de calor tornou-se crescente, podendo ser justificado pela degradação térmica da lignina.

Na tabela 4 são apresentados os resultados do teste de combustão espontânea sugerido pela ONU (2009), bem como as temperaturas máximas atingidas por cada amostra.

Tabela 4 – Resultado do teste de combustão espontânea e temperatura máxima atingida pela amostra

Tratamento	Temperatura do teste	Tamanho do recipiente	Houve combustão?	Temperatura máxima atingida
<i>In natura</i> (madeira)	140°C	100 mm	Não	145,0°C
180°C	140°C	100 mm	Não	141,5°C
220°C	140°C	100 mm	Não	139,4°C
260°C	140°C	100 mm	Não	142,8°C
Carvão vegetal	140°C	100 mm	Não	150,1°C

Nota-se que de acordo com o teste sugerido no Manual de critérios e recomendações da ONU, nenhum dos materiais sofreu combustão espontânea quando submetidos por 24 horas, em estufa com circulação de ar, à temperatura de 140°C, em recipiente de 100 mm.

Assim sendo, considera-se que os mesmos não são substâncias sujeitas à combustão espontânea, conforme classe 4.2, da ONU, portanto, seu transporte não deve estar condicionado às normas da NBR 7500.

Estes resultados corroboram com as opiniões de pesquisadores científicos que

questionam a necessidade de aplicação do teste de combustão espontânea para combustíveis madeireiros, como o carvão vegetal. Rohde (2007) afirma que o único fundamento para classificar o carvão vegetal como substância sujeita a combustão espontânea é a temperatura em que o material entra em ignição e a interação do produto com a temperatura ambiente. Para a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a temperatura de ignição do carvão vegetal está entre 315,8 a 399,2°C, ou seja, em temperaturas muito acima da temperatura ambiente.

Salienta-se que grande parte dos incêndios causados em caminhões que transportam carvão vegetal está relacionada com o mau manuseio do material, que é colocado ainda quente no caminhão, e não com a capacidade de combustão espontânea desta biomassa.

Assim, para o carvão vegetal, recomenda-se a extinção da necessidade de aplicação do teste de combustão espontânea sugerido pela ONU (2009), ou do transporte especial, conforme a norma NBR 7500, uma vez que estas exigências não possuem base científica e implicam em custo extra para os produtores de carvão vegetal, sendo vistas como empecilho para realização do transporte e exportação do produto, prejudicando e enfraquecendo o setor, composto, em sua grande maioria, por pequenos produtores.

4. CONCLUSÕES

- Quanto maior a temperatura do tratamento térmico maior a massa residual dos cavacos quando submetidos ao teste termogravimétrico, sendo considerados os cavacos tratados à 260°C e o carvão vegetal os materiais mais estáveis termicamente.
- As fases exotérmicas dos cavacos de madeira iniciaram em temperaturas superiores a 291°C e do carvão vegetal em temperaturas superiores a 443°C.
- Tanto os cavacos de madeira *in natura* e torreficados quanto o carvão vegetal não sofreram combustão espontânea, portanto, não devem ser enquadrados na classe de risco 4.2 da Resolução da ANTT (2004).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Resolução ANTT Nº 420/02/2004**. ANTT. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/1420/Resolucao_420.html> Acesso em: 20 dez 2016.

ALVES, I. C. N. **Propriedades da madeira e do carvão vegetal em clones de híbridos de *Eucalyptus* cultivados em diferentes ambientes**. 2014. 107 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7500:2003: Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos**. Rio de Janeiro, 47 p., 2004.

BURHENNE, L.; MESSMER, J.; AICHER, T.; LABORIE, M. P. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 101, p. 177–184, 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Lista completa de todos os produtos químicos**. Disponível em: <http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/produto_consulta_completa.asp?qualpagina=1&sqlQuery=sp_TBP RODIDENTIFICACAO_sel> Acesso em: 20 dez 2016.

DOMINGOS, C. A.; PEREIRA, D. D.; CARDOSO, L. S.; TEODORO, R. A.; CASTRO, V. A. Biodiesel – Proposta de um combustível alternativo. **Revista Brasileira de Gestão e Engenharia**. n.5, trab 9, p.134-178, 2012.

MAGALHÃES, M. A. **Tratamento térmico de partículas e pellets de madeira em reator tipo rosca sem fim**. 2016. 55f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) –

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G.; KIM, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Amsterdam, v. 47, p. 232–240, 2013. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.01.019

OLIVEIRA, R. M. **Utilização de técnicas de caracterização de superfícies de madeiras tratadas termicamente**. 2009. 123f. Tese (Doutorado em Ciências/Física Aplicada) – Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 567–576, 2013.

QUINTIERE, J. G.; WARDEN, J. T.; TAMBURELLO, S. M.; MINNICH, T. E. **Spontaneous Ignition in Fire Investigation**. 2012.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* spp.. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.

RANDRIAMANANTENA, T. et al. Thermal behavior of three woods of Madagascar by thermogravimetric analysis in inert atmosphere. In: HIGH-ENERGY PHYSICS INTERNATIONAL CONFERENCE, 4, 2009, Madagascar. **Anais...** Madagascar: 2009.

RECH, C. Estudo sugere uso de serragem como insumo. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 66, 2002.

ROHDE, G. M. O mito da combustão espontânea do carvão vegetal. **Revista da madeira**. Ed. n. 106, 2007.

SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; ALVES, I. C. N.; MAGALHÃES, M. A. Stability to thermal degradation and chemical composition

of woody biomass subjected to the torrefaction process. **Journal of Wood and Wood Products**, 2016. doi: 10.1007/s00107-016-1060-z

SIQUEIRA, A. R. **Estudo da utilização de ligas de magnésio na estrutura de assentos de aeronaves**. 2012. Monografia – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2012.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades**. 2011. 108 P. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

UNITED NATIONS, Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. **Manual of tests and criteria**. Fifth revised edition. New York and Geneva, 2009.

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, p. 3748 – 3762, 2011.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12, p. 1781-1788, 2007. DI: 10.1016/j.fuel. 2006.12.013.

CAPÍTULO III

RESISTÊNCIA DE MADEIRA *IN NATURA* E TORRIFICADA A DIFERENTES FUNGOS XILÓFAGOS

RESUMO – Devido à ampla diversidade, os fungos são capazes de colonizar diversos ambientes, inclusive a madeira destinada à geração de energia, podendo degradá-la e conseqüentemente prejudicar a sua utilização. Sabe-se que a torrefação, ou pré-carbonização, é um tratamento térmico realizado em baixa oxigenação e temperaturas moderadas, que variam entre 200 e 300°C, capaz de acumular carbono e lignina na madeira, diminuindo sua higroscopicidade e tornando-a um material com maior eficiência energética e menor atratividade a microorganismos decompositores. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo estudar a influência da temperatura de torrefação na resistência a degradação biológica da madeira ocasionada por fungos xilófagos. Para realização do estudo, cavacos de madeira *in natura* e torreficados por 20 min nas temperaturas de 180, 220 e 260°C foram submetidos ao ensaio de apodrecimento acelerado, seguindo as normas da ASTM D-2017 (2005). Utilizou-se fungos de podridão branca *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus*, *Phanerochaete chrysosporium* e o fungo de podridão parda *Gloeophyllum trabeum*. Após o período de 12 semanas de exposição, observou-se que o fungo *Pleurotus ostreatus* ocasionou maior degradação dos cavacos *in natura*. A perda de massa ocasionada pelo fungo *Pleurotus ostreatus* nos cavacos *in natura* foram superiores em 50,2 e 100%, respectivamente, aos cavacos torreficados a 180 e 220°C. Concluiu-se que a torrefação conferiu ao material maior resistência ao ataque dos fungos, sendo o tratamento à 260°C o mais eficiente por apresentar menor perda de massa e, conseqüentemente, maior resistência aos microorganismos xilófagos.

Palavras-chave: biomassa, tratamento térmico, apodrecimento, podridão

RESISTANCE OF WOOD CHIPS IN NATURA AND TORREFIED TO DIFFERENT XYLOPHAGE FUNGI

ABSTRACT - Due to their wide diversity, fungi are able to colonize various environments, including wood intended for energy generation, which can degrade and hinder their use. It is known that the torrefaction, or pre-carbonization, is a thermal treatment performed in low oxygenation and moderate temperatures, ranging between 200 and 300°C, able to accumulate carbon and lignin in the wood, reducing its higroscopicidad and making it a material with Higher energy efficiency and lower attractiveness to decomposing microorganisms. Therefore, this work had as objective to study the influence of torrefaction temperature on the resistance to biological degradation of wood caused by xylophagous fungi. In order to carry out the study, fresh wood chips and torrefied for 20 min at temperatures of 180, 220 and 260°C were subjected to the accelerated rotting test, according to ASTM D-2017 (2005). White rot fungi *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus*, *Phanerochaete chrysosporium* and the brown rot fungus *Gloeophyllum trabeum* were used. After the period of 12 weeks of exposure, it was observed that the *Pleurotus ostreatus* fungus caused greater degradation of the in natura chips. The loss of mass caused by the *Pleurotus ostreatus* fungus in the in natura chips were 50.2 and 100% higher, respectively, than the torch chips at 180 and 220°C. It was concluded that the torrefaction gave the material greater

resistance to fungi attack, being the treatment at 260°C the most efficient because it presents less loss of mass and, consequently, greater resistance to xylophagous microorganisms.

Keywords: biomass, heat treatment, decay, rot

1. INTRODUÇÃO

Em virtude da estrutura anatômica e constituição química, a madeira está sujeita a deterioração por vários microorganismos xilófagos, sendo os exemplos mais comuns os fungos, que, ao secretarem enzimas, são capazes de degradar polímeros transformando-os em moléculas menores (SILVA et al., 2014; MENEZES e BARRETO, 2015).

Devido a sua grande diversidade, os fungos são capazes de colonizar diversos ambientes, como o ar, o solo e as árvores, podendo decompor totalmente a madeira ou atacar apenas sua superfície, sendo classificados como apodrecedores, emboloradores e manchadores (ROCHA, 2001; RÊGO e SANTOS, 2015).

Os fungos emboloradores e manchadores são, normalmente, os primeiros a colonizarem o tronco das árvores recém-cortadas e são responsáveis principalmente por manchas e alterações na superfície da madeira. Em contrapartida, os fungos apodrecedores podem degradar a parede celular, resultando em alterações nas propriedades físicas e mecânicas das madeiras (CLAUSEN, 2010; LAZAROTTO et al., 2016a). Dentre os fungos apodrecedores, destacam-se os pertencentes à classe dos basidiomicetos, responsáveis pela podridão branca e podridão parda (STANGERLIN et al., 2013).

Os fungos da podridão branca decompõem, indistintamente, tanto a celulose e hemiceluloses quanto a lignina, deixando a madeira clara ou descolorida (VIVIAN et al., 2015). Os fungos da podridão parda degradam a celulose e hemiceluloses da parede celular, alterando a resistência mecânica do material e conferindo à madeira um aspecto pardo-escuro devido à presença residual da lignina (SILVA et al., 2014; VIVIAN, et al. 2015).

Os fungos, inicialmente, colonizam o interior da madeira com suas hifas formando uma rede, nem sempre visível a olho nu, que preenche o lume das células e passa de uma célula a outra através da parede celular, podendo destruir a estrutura da lamela média e alterar a composição química da madeira, reduzindo a massa e a resistência mecânica do material (LEPAGE, 1986; FERREIRA et al., 2016).

Quando a madeira é destinada à geração de energia na forma de cavacos,

geralmente ela é picada em campo ou transportada diretamente para a fábrica para ser cavaqueada. Posteriormente, os cavacos são depositados em pátios e armazenados por um período de aproximadamente 90 dias, a fim de reduzir a umidade do material. Neste intervalo de tempo, a colonização por fungos é recorrente, causando modificações na madeira que podem reduzir o seu potencial energético.

Neste sentido, a torrefação surge como alternativa para minimizar esses impactos. A torrefação é um tratamento térmico em temperaturas controladas (200 a 300°C) e em baixa oxigenação, capaz de concentrar carbono e lignina na madeira, conseqüentemente, produzir um material com maior densidade energética, menor higroscopicidade e menor atratividade à microorganismos decompositores (VAN DER STELT et al., 2011; LORA et al., 2013; SHANG et al., 2014; PEREIRA et al., 2016).

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo estudar a influência da temperatura de torrefação na resistência a degradação biológica da madeira de *Eucalyptus urophylla* ocasionada por fungos xilófagos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Associações Micorrízicas – BIOAGRO e no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM), ambos pertencentes à Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, MG. Por meio do ensaio de apodrecimento acelerado da American Society for Testing and Materials – ASTM D-2017 (2005), determinou-se a classe de resistência de cavacos de madeira de eucalipto *in natura* e torrificados, quando submetidos ao ataque de fungos xilófagos.

2.1. Torrefação do material

Utilizou-se cavacos de madeira de *Eucalyptus urophylla*, de aproximadamente 7 anos de idade, provenientes de plantios experimentais da Universidade Federal de Viçosa. Os cavacos de madeira foram peneirados, sendo utilizados no experimento aqueles que ficaram retidos na peneira de 16 mm e passaram na peneira de 31,5 mm. Depois da classificação, os cavacos foram secos em estufa a 103±2°C até atingirem 0% de umidade em base seca. Posteriormente, os cavacos foram torrificados por 20 minutos nas temperaturas de 180, 220 e 260°C.

Para a torrefação utilizou-se um reator tipo rosca sem fim desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, conforme descrito por Magalhães (2016).

O reator consiste de quatro componentes básicos: sistema de transporte de biomassa, de aquecimento, de resfriamento e de exaustão dos gases. A temperatura de torrefação foi monitorada por meio de um termômetro digital de marca *Gulton* e modelo *Gulterm 700-10S*, utilizando oito termopares tipo J.

2.2. Caracterização química e umidade de equilíbrio higroscópico

Para a determinação da Umidade de Equilíbrio Higroscópico (UEH) do material, as amostras foram colocadas em uma câmara climática a 20 °C e 65 % de umidade relativa até atingir massa constante. A umidade foi calculada em base seca.

Para obtenção da composição química estrutural amostras de cavacos foram moídos e peneirados na granulometria entre 40 e 60 mesh (ASTM, 1982). Segundo as normativas da TAPPI (1996) determinou-se o teor de extrativos totais. O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). O percentual de lignina solúvel foi determinado por espectrometria conforme Goldschimid (1971). O teor de lignina total foi obtido através da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holoceluloses (celulose + hemiceluloses) foi obtido pela diferença entre o somatório dos teores de lignina total, extrativos e cinzas com o total de 100%.

2.3. Obtenção dos fungos xilófagos

Os fungos foram obtidos por meio de cultura pura e repicados em placa de Petri de aproximadamente 90 mm de diâmetro contendo 25 ml de ágar-batata-dextrose (BDA). O BDA foi preparado na concentração de 39 g de potato glucose agar para 1 L de água deionizada. Após o preparo, o meio foi esterilizado em autoclave a 121°C por 30 minutos. Em seguida, o meio de cultura ainda líquido foi transferido para as placas de Petri. Foram preparadas 6 placas de Petri para cada espécie de fungo, que em seguida, foram inoculadas. O inóculo consistia de um fragmento contendo o micélio do fungo, retirado de uma cultura pura. Após inoculação, as placas foram levadas à câmara incubadora, onde foram mantidas por duas semanas para o crescimento do micélio. Posteriormente, estas placas de BDA serviram como fonte de inóculo.

Foram testados 3 fungos de podridão branca (*Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus* e *Phanerochaete chrysosporium*) provenientes da coleção do Laboratório de Associações Micorrízicas – UFV e um fungo de podridão parda (*Gloeophyllum trabeum*) doado pelo Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal do Mato Grosso - UFMT.

2.4. Ensaio de apodrecimento acelerado

Para o ensaio de apodrecimento acelerado, foram utilizados frascos de vidro com tampa rosqueável com capacidade de 600 mL, onde adicionou-se 83 mL de água destilada e 200 g de solo seco ao ar, com pH e capacidade de retenção de água de 6,5 e 36,68%, respectivamente.

Após o preenchimento dos frascos, adicionou-se três placas suportes de madeira de *Pinus sp.* (3 mm de espessura, 28 mm de largura e 33 mm de comprimento). Estas placas suportes têm o objetivo de propiciar o desenvolvimento inicial dos fungos. Posteriormente, os frascos foram esterilizados a $121 \pm 2^\circ\text{C}$ por 30 minutos e, após resfriados até a temperatura ambiente, foram inoculados com 3 fragmentos de BDA, de aproximadamente 1 cm^2 cada, colonizados pelos fungos a serem testados.

Após a colonização dos fungos na placa suporte (40 dias), os cavacos de madeira foram secos, pesados, esterilizados e introduzidos nos frascos, na razão de cinco cavacos para cada recipiente. Foram realizadas 6 repetições por tratamento/espécie de fungo. Também foram preparados 6 frascos por fungo, contendo três blocos de referência de *Pinus sp.* (9 de espessura, 25 mm de largura e 25 mm de comprimento), madeira cuja resistência à deterioração é conhecida.

Os frascos de correção (sem fungos) foram preparados na quantidade de 6 repetições por tratamento, contendo 5 corpos de prova por frascos de ensaio, e receberam o mesmo tratamento e manipulação dos demais. Os frascos de correção determinam a perda de massa resultante de ações não atribuídas aos fungos.

Todo o experimento foi realizado sob condições assépticas e mantido em sala de incubação ($25 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa), permanecendo por um período de 12 semanas sob o ataque dos fungos.

Após o período de incubação, os corpos de prova foram retirados dos frascos, limpos cuidadosamente para remoção do excesso de micélio aderido, secos em estufa e pesados, obtendo a massa após o período de ataque dos fungos. De posse dos dados de massa inicial e final dos corpos de prova, o índice de susceptibilidade e a classe de resistência do material foram determinados de acordo com o estabelecido pela norma ASTM D-2017 (2005), descritos na equação 1 e tabela 1.

$$PM = (Mi - Mf) / Mi * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde: PM = perda de massa da espécie (%); Mi = massa inicial da espécie de interesse (g); Mf = massa final da espécie de interesse (g).

$$ISA = PMi / PMr * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde: ISA = índice de susceptibilidade ao ataque (%); PMi = perda de massa da espécie de interesse (%); PMr = perda de massa da espécie de referência (*Pinus sp.*) ao fungo apodrecedor utilizado (%).

Tabela 1 – Tabela de classificação da resistência da madeira ao ataque de fungos xilófagos

Classe de resistência	Perda de massa (%)	Massa residual (%)
Altamente resistente (AR)	0-10	90-100
Resistente (R)	11-24	76-89
Moderadamente resistente (MR)	25-44	56-75
Não resistente (NR)	>45	>55

Fonte: Norma ASTM D-2017 (2005), adaptada.

2.5. Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, contendo 4 tratamentos (*in natura* e 3 temperaturas de torrefação) e 4 fungos, em seis repetições, totalizando 96 unidades amostrais.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas diferenças significativas entre os tratamentos, aplicou-se o teste Tukey, a 5% de significância, utilizando o software STATISTICA 8.0 (STATSOFT, 2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 2 são apresentados os valores médios da umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) e da composição química da madeira de eucalipto *in natura* e torrificada.

Tabela 2 – Valores médios da umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) e composição química da madeira de eucalipto *in natura* e torreficada

Propriedade	Temperatura de torrefação			
	<i>In natura</i>	180°C	220°C	260°C
UEH (%)	12,49 a	9,11 b	5,50 c	5,08 c
Holoceluloses (%)	69,21 a	70,17 a	60,48 b	45,64 c
Lignina Total (%)	26,87 b	25,37 b	32,26 b	47,54 a
Extrativos (%)	3,63 d	4,24 c	7,00 a	6,47 b
Cinzas (%)	0,29 b	0,22 b	0,28 b	0,35 a

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem significativamente entre si (Tukey $p > 0,05$)

Na tabela 3 são apresentados os valores médios da perda de massa de cada tratamento quando submetido ao ataque de determinado fungo.

Tabela 3 – Valores médios de perda de massa (%) da madeira de pinus, eucalipto *in natura* e torreficados submetidos ao ataque de fungos xilófagos

Fungo	Temperatura de torrefação				
	Pinus	<i>In natura</i>	180°C	220°C	260°C
<i>Trametes versicolor</i>	5,56 A	1,62 Bab	0,86 BCa	0,60 BCa	-0,15 Da
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	6,95 A	1,19 Bb	1,22 Ba	-0,13 Bb	-0,32 Ba
<i>Pleurotus ostreatus</i>	5,84 A	2,78 Ba	1,85 BCa	0,00 CDb	-0,51 Ea
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	2,05 A	0,91 Bb	1,01 Ba	0,92 Ba	0,37 Ba

Médias seguidas na horizontal por uma mesma letra maiúscula ou na vertical por uma mesma letra minúscula não diferem significativamente entre si (Tukey $p > 0,05$)

De acordo com a norma ASTM D-2017, por apresentarem massa residual superior a 90%, os cavacos de madeira de *Eucalyptus urophylla* foram classificados como altamente resistentes ao ataque dos fungos xilófagos.

Observa-se que a torrefação conferiu ao material maior resistência à degradação por fungos, visto que, numericamente, a torrefação reduziu a perda de massa ocasionada pelo ataque de qualquer fungo xilófago, sendo que, quanto maior a temperatura de torrefação, menor foi a deterioração. O mesmo foi observado por Lazarotto et al. (2016a) que termorretificando a madeira de duas espécies de eucalipto observou que os fungos ocasionavam menores perdas de massa em madeiras tratadas em maiores

temperaturas e/ou por períodos mais longos de exposição.

Verifica-se que a torrefação tornou os cavacos de madeira mais resistentes à degradação provocada pelos fungos xilófagos *Trametes* sp e *Pleurotus ostreatus*. Para estes fungos, os valores relativos à perda de massa indicam que o tratamento de torrefação à 260°C foi o mais eficiente.

Silva et al. (2008) explicam que a madeira quando exposta a elevadas temperaturas é modificada quimicamente, podendo degradar as hemiceluloses, que são fonte de alimento para os fungos, e gerar novos extrativos que têm a capacidade de atuar como fungicidas. Verificou-se neste trabalho que a torrefação reduziu os teores de holoceluloses e aumentou os teores de extrativos e lignina, o que justifica a maior resistência dos cavacos de madeira tratados a 260°C para os fungos *Trametes versicolor* e *Pleurotus ostreatus*, visto que estes fungos degradam, preferencialmente, a celulose e hemiceluloses.

Em comparação aos cavacos de eucalipto *in natura*, para o fungo *Trametes versicolor*, verificou-se que os cavacos tratados a 180°C tiveram sua perda de massa reduzida em 46,91%, enquanto que para os tratamentos de 220 e 260°C a perda de massa foi reduzida em, respectivamente, 62,96 e 109%. A perda de massa equivalente a 1,62% da madeira *in natura* submetida ao ataque do fungo *Trametes versicolor* foi próximo ao observado por Lazarotto et al. (2016a) que estudando a madeira de *Eucalyptus tereticornis* ao ataque do fungo *Trametes* sp. obtiveram perda de massa de 2,06% após 12 semanas de exposição.

Para o fungo *Pleurotus ostreatus*, verifica-se para os cavacos torreficados a 180°C que a perda de massa foi reduzida em 33,45% em relação aos cavacos *in natura*, enquanto para os tratamentos de 220 e 260°C a perda de massa foi, respectivamente, 100 e 118% menor em comparação aos cavacos de eucalipto *in natura*.

Dentre os fungos, tanto o *Phanerochaete chrysosporium* quanto o *Gloeophyllum trabeum* ocasionaram perda de massa significativamente similar para todos os tratamentos, inclusive nos cavacos torreficados. Entretanto, observa-se numericamente uma diminuição destes valores com o aumento da temperatura de torrefação. Oliveira et al. (2005) demonstraram que a presença de algumas substâncias, dentre elas os extrativos, torna a madeira mais resistente à deterioração de alguns xilófagos, logo, acredita-se que na torrefação do material houve geração/acúmulo de extrativos suficientes para minimizar o ataque por estes fungos, conforme comprova a tabela 2. Brand et al. (2006) explicam que os extrativos possuem agentes quelantes, capazes de formar complexos com metais e proteger a madeira. Lazarotto et al. (2016b) confirmam

que os extrativos podem atuar como fungicidas.

Nota-se que para a maior parte dos fungos, os cavacos torreficados à 260°C obtiveram um aumento de massa. Uma possível explicação para este fato é que, apesar dos fungos não terem degradado significativamente os cavacos, eles colonizaram o material, sendo o aumento da massa resultante da presença de hifas, que por estarem fortemente ancoradas ao material não foram removidas pelo processo de limpeza dos cavacos, como comprova a figura 1.



Figura 1 – Hifas do fungo *Trametes* sp. ancoradas aos cavacos torreficados a 260°C.

Segundo Vivian et al. (2015), os fungos da podridão branca decompõem, indistintamente, tanto a holocelulose quanto a lignina, entretanto, observa-se neste trabalho que o aumento no teor de lignina no material, ocasionado pela torrefação, aumentou a resistência dos cavacos à degradação pelos fungos de podridão branca.

Nos cavacos de eucalipto *in natura*, a maior degradação foi ocasionada pelo fungo de podridão branca *Pleurotus ostreatus*, enquanto a menor degradação foi observada nos cavacos atacados pelo fungo de podridão parda *Gloeophyllum trabeum*. Isso já era esperado uma vez que madeiras de folhosas apresentam menores teores de lignina, logo, fungos de podridão branca (*Pleurotus ostreatus*) se desenvolvem melhor que fungos de podridão parda (*Gloeophyllum trabeum*).

Oliveira et al. (2005) ao submeterem amostras de *Eucalyptus urophylla* ao ataque do fungo *Gloeophyllum trabeum* observaram perda de massa equivalente à 1,3%, um valor que corrobora ao encontrado neste trabalho.

Para os cavacos tratados a 180 e 260°C, nota-se que não houve diferença significativa na degradação do material, visto que nestas temperaturas as perdas de massa foram semelhantes, independente do fungo.

Observa-se para os cavacos tratados a 220°C que houve diferença significativa na degradação dos cavacos pelos fungos, sendo o *Trametes* sp. e o *Gloeophyllum trabeum* os que mais causaram perda de massa. Essas diferenças de degradação podem ser explicadas pelas distintas necessidades nutricionais de cada fungo xilófago, conforme

justificado por Carvalho et al. (2015).

Na tabela 4 são apresentados os valores médios dos índices de susceptibilidade dos tratamentos.

Tabela 4 – Valores médios do índice de susceptibilidade (%) dos cavacos torreficados submetidos ao ataque de fungos xilófagos

Fungo	Temperatura de torrefação			
	<i>In natura</i>	180°C	220°C	260°C
<i>Trametes</i> SP	29,08 Aab	15,47 ABb	10,77 ABb	-2,73 Cb
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	17,12 Ab	17,55 Ab	-1,87 Ab	-4,60 Ab
<i>Pleurotus ostreatus</i>	47,57 Aa	31,65 ABab	0,02 BCb	-8,76 Db
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	44,39 Aa	49,28 Aa	44,90 Aa	18,12 Aa

Médias seguidas na horizontal por uma mesma letra maiúscula ou na vertical por uma mesma letra minúscula não diferem significativamente entre si (Tukey $p > 0,05$)

Segundo Curling e Murphy (2002), um índice de susceptibilidade superior a 100 indica que o material estudado é menos resistente que a madeira de referência. Em contrapartida os materiais mais resistentes que a madeira de referência apresentam índices inferiores a 100. Observa-se que tanto os cavacos *in natura* quanto os cavacos torreficados apresentaram índices de susceptibilidade menores que 100, indicando que a madeira estudada é mais resistente que a madeira referência (*Pinus* sp.)

Assim, a torrefação apenas reduziu significativamente o índice de susceptibilidade dos cavacos expostos ao ataque dos fungos *Trametes* sp e *Pleurotus ostreatus*. Entretanto, nota-se que para todos os tratamentos os cavacos de madeira *in natura* obtiveram, numericamente, maiores índices de susceptibilidade, indicando que a torrefação tornou os cavacos menos susceptíveis ao ataque dos fungos.

Segundo Hong et al. (1994) elevados teores de açúcares e amido armazenados nas células aumentam a susceptibilidade da madeira ao apodrecimento, logo, a torrefação reduz a susceptibilidade da madeira ao apodrecimento, pois verificou-se a diminuição dos teores de holoceluloses com esta técnica, principalmente nas temperaturas mais elevadas, 220 e 260°C.

Carvalho et al. (2015) submetendo o *Eucalyptus robusta*, *E. tereticornis* e *E. dunnii* ao ataque do fungo *G. trabeum* encontraram índices de susceptibilidade iguais a respectivamente, 30,29, 49,96 e 55,54%. Isto indica que, quanto ao ataque do fungo *G. trabeum* a madeira de *Eucalyptus urophylla* é mais susceptível que o *E. robusta*, e

menos susceptível que os *E. tereticornis* e *E. dunnii*.

Carvalho et al. (2015) também submeteram estas espécies de eucalipto ao ataque do fungo de podridão branca *Trametes versicolor* e encontraram índices de susceptibilidade equivalentes a 22,72, 39,78 e 62,11%, respectivamente, para o *Eucalyptus robusta*, *E. tereticornis* e *E. dunnii*. Logo, presume-se que, quanto ao ataque do fungo *T. versicolor*, o *Eucalyptus urophylla* é, novamente, mais susceptível que o *E. robusta*, e menos susceptível que os *E. tereticornis* e *E. dunnii*.

4. CONCLUSÕES

- De acordo com a norma ASTM D-2017 (2005), a madeira de *Eucalyptus urophylla* é classificada como altamente resistente ao ataque dos fungos *Pleurotus ostreatus*, *Trametes versicolor*, *Phanerochaete chrysosporium* e *Gloeophyllum trabeum*.
- A maior degradação nos cavacos *in natura* de *Eucalyptus urophylla* foi ocasionada pelo fungo *Pleurotus ostreatus*, em contrapartida, o fungo *Gloeophyllum trabeum* foi o que menos degradou.
- A torrefação conferiu aos cavacos de madeira maior resistência ao ataque de fungos xilófagos, sendo o tratamento de 260°C o mais eficiente para todos fungos avaliados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D2017: Standard method for accelerated laboratory test of natural decay resistance for woods.** West Conshohocken: ASTM International, 2005.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials.** Philadelphia, 1982.

BRAND, M. A.; ANZALDO, J.; MORESCHI, J. C. Novos produtos para o tratamento preservante da madeira: Perspectivas da pesquisa e utilização. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 129-137, 2006.

CARVALHO, D. E.; SANTINI, E. J.; GOUVEIA, F. N.; ROCHA, M. P. Resistência natural de quatro espécies florestais submetidas a ensaio com fungos apodrecedores. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 271-276, 2015.

CLAUSEN, C. A. Biodeterioration of wood. In: ROSS, R.J. **Wood handbook: wood as an engineering material.** ed. Madison: USDA, p. 312-327. 2010.

CURLING S. F.; MURPHY, R. J. The use of the Decay Susceptibility Index (DSI) in the evaluation of biological durability tests of wood based board materials. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 60, n. 3, p. 224-226, 2002.

FERREIRA, F. D. S.; BATISTA, I. H.; FERREIRA, A. D. S.; ALBUQUERQUE, C. C. D.; SILVA, A. C. Otimização das condições de crescimento de fungos degradadores de madeira. **Marupiara Revista Científica do CESP/UEA**, v. 1, n. 1, 2016.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Eds) **Lignins.** New York: Wiley Interscience, p. 241-266, 1971.

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.

HONG, L. T.; LIM, S. C. Durability of rubberwood. In: Hong, L. T.; Lim, S. C. (Eds.). **Rubberwood processing and utilization**. Kuala Lumpur: Forest research Institute of Malaysia, p. 37-50, 1994.

LAZAROTTO, M.; OLIVEIRA, L. S.; HARAKAVA, R.; ZANATTA, P.; FARIAS, C. R. J. Identificação de fungos emboloradores em madeira de *Pinus* spp. em laboratório. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 602-605, 2016a.

LAZAROTTO, M.; CAVA, S. S.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A.; MISSIO, A. L.; GOMES, L. G.; MATTOSO, T. R. Resistência biológica e colorimetria da madeira termorretificada de duas espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 135-145. 2016b <https://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000100015>

LEPAGE, E. S. Manual de preservação de madeiras. São Paulo: **IPT**, 1986. v. 1, p. 342.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; ANDRADE, R. V. Torrefação de madeira. In: **Bioenergia & Biorrefinaria - Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Editores: Santos, F.; Colodette, J.; Queiroz, J. H. Viçosa, MG, p. 401-427. 2013.

MAGALHÃES, M. A. **Tratamento térmico de partículas e pellets de madeira em reator tipo rosca sem fim**. 2016. 55f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

MENEZES, C.; BARRETO, A. R. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos por fungos basidiomicetos: Caracterização dos resíduos e estudo do complexo enzimático fúngico. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1365-1391, 2015.

OLIVEIRA, J. T.; TOMASELLO, M.; SILVA, J. C. Resistência natural da madeira de sete espécies de eucalipto ao apodrecimento. **Revista Árvore**, v. 29, n. 6, p. 993-998, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622005000600019>.

PEREIRA, M. P. C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; OLIVEIRA, A. C. Torrefação de cavacos de eucalipto para

fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 269-275, 2016.

RÊGO, C. M.; SANTOS, F. S. Ocorrência de fungos anemófilos e sua relação com fatores abióticos em Barreiras, Bahia. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 13, n. 4, p. 265-271, 2015.

ROCHA, M. P. Biodegradação e preservação da madeira. 5. ed. Curitiba: **Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná**, 2001. 94 p. (Série Didática, 01/01).

SILVA, M. R.; MAHADO, G. O.; ALIL JUNIOR, C. Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas de *Pinus elliotti*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11, 2008, Londrina. **Anais...** UEL - EBRAMEM, 2008.

SILVA, L. F.; PAES, J. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; FURTADO, E. L.; ALVES, F. R. Deterioração da madeira de *Eucalyptus* spp. por fungos xilófagos. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 393-400, 2014.

SHANG, L.; AHRENFELDT, J.; HOLM, J. K.; BACH, L. S.; STELTE, W.; HENRIKSEN, U. B. Kinetic model for torrefaction of wood chips in a pilot-scale continuous reactor. In: **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 108, p. 109-116, 2014.

STANGERLIN, D. M.; COSTA, A. F.; GARLET, A.; PASTORE, T. C. M. Resistência natural da madeira de três espécies amazônicas submetidas ao ataque de fungos apodrecedores. **Ciência da Madeira**, v. 4, n. 1, p. 15-32, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v.04n01a02>.

STATSOFT INC. Statistica data analysis system version 8.0. Tulsa: **Statsoft Inc.**, 2007.

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

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, p. 3748 – 3762, 2011.

VIVIAN, M. A.; SANTINI, E. J.; MODES, K. S.; GARLET, A.; MORAIS, W. W. C. Resistência biológica da madeira tratada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana* a fungos apodrecedores em ensaios de laboratório. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 175-183, 2015.

CONCLUSÕES GERAIS

- A torrefação dos cavacos de *Eucalyptus urophylla* proporcionou melhorias na sua qualidade, principalmente, o aumento da densidade energética e acúmulo de lignina e carbono no material, apresentando-se viável tecnicamente.
- Tanto a torrefação quanto a carbonização não classificam o material como substância sujeita a combustão espontânea, segundo o Manual de Critérios e Recomendações da ONU.
- A torrefação aumenta a resistência do material ao ataque de fungos xilófagos.
- O tratamento realizado a 260°C mostrou-se como melhor opção para o tratamento térmico dos cavacos de madeira, por gerar um produto mais energético, mais estável termicamente e de maior resistência a fungos xilófagos.